

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería y Sistemas  
Telecomunicación



Trabajo Fin de Máster:

*Estudio Comparativo de los  
Parámetros Acústicos de la  
Norma UNE-EN ISO 3382-1  
Medidos con Fuente Puntual y  
con el Sistema de Refuerzo  
Sonoro en Salas de Cine*

*Helena Alves Santos*

*Julio 2014*



# Máster en Ingeniería Acústica

## de la Edificación y Medio Ambiente

Trabajo Fin de Máster		
Título	Estudio comparativo de los parámetros acústicos de la norma UNE-EN ISO 3382-1 medidos con fuente puntual y con el sistema de refuerzo sonoro en salas de cine	
Autor	Helena Alves Santos	VºBº
Tutor	Juan José Gómez Alfageme	
Ponente		
Tribunal		
Presidente	Antonio Pedrero González	
Secretario	José Luis Sánchez Bote	
Vocal	Juan Sancho Gil	
Fecha de lectura		
Calificación		

El Secretario:



# Índice

Índice	i
Índice de figuras	v
Índice de tablas	xvii
Índice de ecuaciones	xxiii
Resumen	xxv
Summary	xxvii
1 Introducción	1
2 Conceptos teóricos	3
2.1. La norma UNE-EN ISO 3382-1 y sus parámetros	5
2.1.1. Métodos de medida	5
2.1.2. Parámetros acústicos	6
2.1.2.1. Tiempo de reverberación	6
2.1.2.2. Tiempo de reverberación inicial (EDT)	7
2.1.2.3. Claridad (C80)	8
2.1.2.4. Definición (D50)	8
2.1.2.5. Tiempo central (Ts)	9
2.1.2.6. Fracción de Energía Lateral (LF)	10
2.2. Modelado por ordenador: EASE	11
2.2.1. Teoría estadística	11
2.2.2. Teoría geométrica	12
2.2.3. Teoría ondulatoria	14
2.3. Salas de cine	14
2.3.1. Proyección de las películas y pantalla	15
2.3.2. Geometría	17
2.3.3. Acústica	19
2.3.4. Sistema de refuerzo sonoro	22

3	Estado de la cuestión	25
4	Descripción del recinto	37
5	Métodos de medida, simulación y análisis	45
5.1.	Medición in situ	47
5.1.1.	Instrumentación	47
5.1.2.	Procedimiento de medida	48
5.1.2.1.	Dimensiones y selección de puntos	48
5.1.2.2.	Elección del método de medida	51
5.1.2.3.	Orden de medición	52
5.1.3.	Procesado y análisis de datos	52
5.2.	Simulación con EASE 4.3	56
5.2.1.	Creación del modelo	56
5.2.2.	Validación del modelo	58
5.2.3.	Procesado de los datos	66
6	Resultados de las mediciones	69
6.1.	Fuente Omnidireccional	71
6.1.1.	Comprobación de la relación impulso-ruido	71
6.1.2.	Diferencias en T20 , T30 y EDT promedio de la sala aplicando o no el Criterio de Chauvenet	73
6.1.3.	Promedios de la sala	74
6.1.4.	Promedios por posición de fuente	79
6.1.5.	Promedios por zonas	81
6.1.6.	Distribución en función de la distancia	90
6.1.7.	Valores globales	92
6.2.	Sistema de refuerzo sonoro de la sala	93
6.2.1.	Comprobación de la relación impulso-ruido	93
6.2.2.	Diferencias en T20, T30 y EDT promedio de la sala aplicando o no el Criterio de Chauvenet	96

6.2.3. Promedios de la sala	97
6.2.4. Promedios por posición de fuente	106
6.2.5. Promedios por zonas	108
6.2.6. Distribución en función de la distancia	120
6.2.7. Valores globales	123
7 Resultados de la simulación	125
7.1. Fuente omnidireccional	127
7.1.1. Promedios de la sala	127
7.1.2. Promedios por posición de fuente	130
7.1.3. Promedios por zonas	132
7.1.4. Distribución en función de la distancia	139
7.1.5. Valores globales	142
7.2. Sistema de refuerzo sonoro de la sala	142
7.2.1. Promedios de la sala	143
7.2.2. Promedios por posición de fuente	151
7.2.3. Promedios por zonas	153
7.2.4. Distribución en función de la distancia	163
7.2.5. Valores globales	165
8 Estudio comparativo de los resultados	167
8.1. Comparación de las mediciones y la simulación	169
8.1.1. Tiempo de reverberación: T20 y T30	169
8.1.2. Tiempo de reverberación inicial: EDT	172
8.1.3. Claridad	174
8.1.4. Definición	175
8.1.5. Tiempo central	177
8.1.6. Fracción de Energía Lateral	179
8.2. Comparación de las mediciones: Fuente omnidireccional y sistema de refuerzo sonoro	181

8.2.1. Tiempo de reverberación: T20 y T30	181
8.2.2. Tiempo de reverberación inicial: EDT	185
8.2.3. Claridad	187
8.2.4. Definición	189
8.2.5. Tiempo central	191
8.2.6. Fracción de Energía Lateral	192
8.3. Comparación de algunas respuestas al impulso	195
9 Conclusiones y líneas futuras de trabajo	199
10 Anexos	205
10.1. Mediciones y desviación típica calculada según la norma UNE EN-ISO 3382-1	207
10.2. Mediciones e incertidumbre calculada por el método de la GUM	208
10.3. Gráficas del estudio comparativo	216
10.3.1. Comparación mediciones y simulación	216
10.3.2. Comparación entre métodos	225
11 Referencias bibliográficas	229



## Índice de figuras

Figura 1.	Curvas de decrecimiento de energía para las medidas del tiempo de reverberación (T10, T20 y T30) [5]	7
Figura 2.	Curva de decrecimiento para el cálculo del Tiempo de reverberación inicial (EDT) [5]	7
Figura 3.	Respuesta al impulso para la medida de la Claridad (C80) [5]	8
Figura 4.	Respuesta al impulso para la medida de la Definición (D50) [5]	9
Figura 5.	Respuesta impulsiva cuadrática para la medida del Tiempo Central (Ts) [5]	10
Figura 6.	Respuesta impulsiva de los micrófonos bidireccional y omnidireccional para la medida de la Fracción de Energía Lateral (LF) [5]	10
Figura 7.	Teoría geométrica: fuentes imagen	13
Figura 8.	Efecto cojín o <i>pincushion</i>	17
Figura 9.	Relación entre las dimensiones de un sala de cine	18
Figura 10.	Ángulo de visión desde el fondo de la sala [9]	19
Figura 11.	Curvas NC para la valoración del ruido de fondo	20
Figura 12.	Curvas STC para la valoración del aislamiento entre salas	20
Figura 13.	Tiempo de Reverberación en la banda de 500 Hz para salas de cine	21
Figura 14.	Posición de los altavoces de pantalla	22
Figura 15.	Curva X de ecualización	23
Figura 16.	Valores del tiempo de reverberación recomendados según el uso y tamaño de la sala según Beranek [28]	30
Figura 17.	Mapa de la situación de los cines Kinépolis [49]	39
Figura 18.	Alzado lateral de la sala diseñada con EASE. Dimensiones en metros.	40
Figura 19.	Planta de la sala 6 diseñada con EASE.	40

Figura 20. Recinto en 3 dimensiones diseñado con EASE (P=puertas de entrada/salida, V=rejilla de ventilación)	41
Figura 21. Fotografías de la sala 6	42
Figura 22. Rejilla de ventilación (superior-izquierda), butaca (superior-derecha) y puertas de salida laterales de la parte delantera (inferior)	42
Figura 23. Coeficientes de absorción de los materiales de la sala	43
Figura 24. Plano de la sala: posiciones de las fuentes y micrófono	49
Figura 25. Modelo de la sala creado en EASE 4.3	57
Figura 26. Zonas de audiencia creadas y zonas sin butacas (amarillo y naranja)	57
Figura 27. Diferencias entre los tiempos de reverberación (T30) medidos	58
Figura 28. Coeficientes de absorción de los materiales utilizados (izquierda) y diferencias entre T30 medido y simulado (derecha)	59
Figura 29. Tiempo de reverberación para el primer modelo realizado	60
Figura 30. Coeficientes de absorción de los materiales (izquierda) y diferencias entre T30 medido y simulado para las 2 primeras pruebas (derecha)	60
Figura 31. Tiempo de reverberación para el segundo modelo	61
Figura 32. Coeficientes de absorción de los materiales (izquierda) y diferencias entre T30 medido y simulado para las 3 primeras pruebas (derecha)	62
Figura 33. Tiempo de reverberación para el tercer modelo	62
Figura 34. Coeficientes de absorción de los materiales (izquierda) y diferencias entre T30 medido y simulado para las 3 primeras pruebas (derecha)	63
Figura 35. Tiempo de reverberación del modelo final	64
Figura 36. Diferencias entre los promedios medidos y los promedios simulados	64
Figura 37. Nivel de ruido en la sala	67

Figura 38. Diferencias entre los tiempos de reverberación medios de la sala utilizando o no el criterio de Chauvenet	73
Figura 39. Diferencias entre T20, T30 y EDT medios utilizando todos los valores o sólo los "correctos"	74
Figura 40. Diferencias entre los promedios de los parámetros medidos con las señales MLS y barrido	75
Figura 41. Tiempo de reverberación promedio de la sala	75
Figura 42. Tiempo de reverberación Inicial – EDT promedio	77
Figura 43. Claridad [dB] y Definición [-] promedio de la sala	77
Figura 44. Tiempo Central [ms] y Fracción de Energía Lateral [-] promedio	78
Figura 45. Tiempo de reverberación promedio por posición de fuente	79
Figura 46. EDT promedio por posición de fuente	80
Figura 47. Claridad y Definición por posición de fuente	80
Figura 48. TS y LF promedio por posición de fuente	81
Figura 49. Diferencias entre los valores de T20 medidos para cada zona y tipo de señal (T20 barrido - T20 MLS)	82
Figura 50. Diferencias entre los valores de T30 medidos para cada zona y tipo de señal (T30 barrido - T30 MLS)	82
Figura 51. Diferencias entre EDT medido con MLS y con barrido	83
Figura 52. Diferencias en C80 entre las medidas de MLS y con barrido	83
Figura 53. Diferencias en D50 medidos con MLS y barrido	84
Figura 54. Diferencias en Ts entre valores medidos con MLS y con barrido	84
Figura 55. Diferencias en LF entre valores medidos con MLS y con barrido	85
Figura 56. T20 [s] en función de la frecuencia y posición de micrófono	86
Figura 57. T30 [s] en función de la frecuencia y posición de micrófono	86
Figura 58. EDT [s] en función de la frecuencia y posición de micrófono	87
Figura 59. C80 [dB] en función de la frecuencia y posición de micrófono	88
Figura 60. D50 [-] en función de la frecuencia y posición de micrófono	88

Figura 61. $T_s$ [ms] en función de la frecuencia y posición de micrófono	89
Figura 62. $LF$ [-] en función de la frecuencia y posición de micrófono	90
Figura 63. Distribución de $T_{20}$ , $T_{30}$ y $EDT$ en función de la distancia	90
Figura 64. $D_{50}$ [-] para baja frecuencia en función de la distancia	91
Figura 65. $C_{80}$ [dB] para baja frecuencia en función de la distancia	91
Figura 66. $T_s$ para las bandas de 100 Hz y 125 Hz en función de la distancia entre fuente y receptor	92
Figura 67. Diferencias entre los tiempos de reverberación medios promediando todas las fuentes utilizando o no el criterio de Chauvenet	96
Figura 68. Diferencias entre los tiempos de reverberación medios en tercios de octava promediando todas las fuentes utilizando o no el criterio de Chauvenet	97
Figura 69. Diferencia entre los promedios de los distintos medidos con señal MLS o con barrido sinusoidal	98
Figura 70. Tiempo de reverberación promedio de la sala medido con el sistema de refuerzo sonoro	98
Figura 71. Tiempo de reverberación Inicial – $EDT$ promedio medido con el sistema de refuerzo sonoro	99
Figura 72. Claridad [dB] y Definición [-] promedio de la sala medido con el sistema de refuerzo sonoro	101
Figura 73. Tiempo Central [ms] y Fracción de Energía Lateral [-] promedio medido con el sistema de refuerzo sonoro	101
Figura 74. Tiempo de reverberación para distintas agrupaciones de fuentes	102
Figura 75. Tiempo de Reverberación Inicial [s] promedio para distintas agrupaciones de fuentes	103
Figura 76. Claridad [dB] y Definición [-] promedio para distintas agrupaciones de fuentes	104
Figura 77. $T_s$ [ms] promedio para distintas agrupaciones de fuentes	105
Figura 78. $LF$ [-] promedio para distintas agrupaciones de fuentes	106

Figura 79. Tiempo de reverberación promedio por posición de fuente	107
Figura 80. EDT promedio por posición de fuente	107
Figura 81. Claridad y Definición por posición de fuente	108
Figura 82. TS y LF promedio por posición de fuente	108
Figura 83. Diferencias entre los valores de T20 medidos para cada zona y tipo de señal (T20 barrido - T20 MLS)	109
Figura 84. Diferencias entre los valores de T30 medidos para cada zona y tipo de señal (T30 barrido - T30 MLS)	109
Figura 85. Diferencias entre los valores de EDT medidos para cada zona y tipo de señal (EDT barrido - EDT MLS)	110
Figura 86. Diferencias entre los valores de C80 medidos para cada zona y tipo de señal (C80 barrido – C80 MLS)	111
Figura 87. Diferencias entre los valores de TS medidos para cada zona y tipo de señal (TS barrido – TS MLS)	111
Figura 88. Diferencias entre los valores de LF medidos para cada zona y tipo de señal (LF barrido – LF MLS)	111
Figura 89. T20 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	112
Figura 90. T30 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	114
Figura 91. EDT para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	115
Figura 92. C80 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	116
Figura 93. D50 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	117
Figura 94. TS para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	118
Figura 95. LF para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	120
Figura 96. EDT para media frecuencia en función de la distancia fuente - receptor	121
Figura 97. T20 para baja frecuencia en función de la distancia fuente - receptor	121
Figura 98. T30 en baja frecuencia en función de la distancia fuente - receptor	122

Figura 99. C80 en frecuencias medias en función de la distancia fuente - receptor	122
Figura 100. TS en frecuencias medias en función de la distancia fuente - receptor	123
Figura 101. T20 [s] y T30 [s] promedio simulado con fuente omnidireccional	128
Figura 102. EDT [s] promedio simulado con fuente omnidireccional	128
Figura 103. C80 [dB] y D50 [-] promedio simulado con fuente omnidireccional	129
Figura 104. Ts [ms] y LF [-] promedio simulado con fuente omnidireccional	130
Figura 105. Tiempo de reverberación promedio simulado por posición de fuente omnidireccional	130
Figura 106. EDT [s] promedio simulado por posición de fuente omnidireccional	131
Figura 107. Claridad y Definición simulados por posición de fuente omnidireccional	131
Figura 108. TS y LF promedio simulados por posición de fuente omnidireccional	132
Figura 109. T20 [s] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono	133
Figura 110. T30 [s] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono	133
Figura 111. EDT [s] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono	134
Figura 112. C80 [dB] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono	135
Figura 113. D50 [-] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono	135
Figura 114. Ts [ms] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono	136

Figura 115. LF [-] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono	136
Figura 116. T20 [s] en la banda de octava de 1 kHz para F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha)	137
Figura 117. EDT [s] en la banda de octava de 1 kHz para F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha)	137
Figura 118. C80 [dB] en la banda de octava de 1 kHz para F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha)	138
Figura 119. D50 [%] en la banda de octava de 1 kHz para F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha)	138
Figura 120. LF [%] en la banda de octava de 1 kHz para F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha)	139
Figura 121. T20 en función de la distancia para frecuencias bajas	139
Figura 122. T30 en función de la distancia para distintas frecuencias	140
Figura 123. EDT en función de la distancia para distintas frecuencias	140
Figura 124. C80 en función de la distancia para distintas frecuencias	141
Figura 125. D50 en función de la distancia para distintas frecuencias	141
Figura 126. Ts en función de la distancia para distintas frecuencias	142
Figura 127. Tiempo de reverberación promedio de la sala simulado con el sistema de refuerzo sonoro	143
Figura 128. Tiempo de reverberación Inicial – EDT promedio simulado con el sistema de refuerzo sonoro	144
Figura 129. Claridad [dB] y Definición [-] promedio de la sala simulado con el sistema de refuerzo sonoro	147
Figura 130. Tiempo Central [ms] y Fracción de Energía Lateral [-] promedio de la sala simulado con el sistema de refuerzo sonoro	150
Figura 131. T20 y T30 promedio simulado por posición de fuente	151
Figura 132. EDT promedio simulado por posición de fuente	151
Figura 133. Claridad y Definición simulado por posición de fuente	152

Figura 134.	TS y LF promedio simulado por posición de fuente	152
Figura 135.	T20 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	153
Figura 136.	T30 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	154
Figura 137.	EDT para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	156
Figura 138.	C80 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	157
Figura 139.	D50 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	158
Figura 140.	TS para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	159
Figura 141.	LF para distintas posiciones	160
Figura 142.	T30 [s] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)	161
Figura 143.	EDT [s] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)	161
Figura 144.	C80 [dB] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)	162
Figura 145.	D50 [%] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)	162
Figura 146.	Ts [ms] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)	163
Figura 147.	LF [%] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)	163
Figura 148.	T20 simulado en función de la distancia	164
Figura 149.	EDT simulado en función de la distancia	164
Figura 150.	Ts simulado en función de la distancia	164
Figura 151.	C80 simulado en función de la distancia	165
Figura 152.	Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: T20 (izquierda) y T30 (derecha)	170
Figura 153.	Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación: T20 (izquierda) y T30 (derecha)	170



Figura 154. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: T20	171
Figura 155. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: T30	171
Figura 156. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: EDT	172
Figura 157. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación: EDT	173
Figura 158. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: EDT	173
Figura 159. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: C80	174
Figura 160. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación: C80	174
Figura 161. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: C80	175
Figura 162. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: D50	176
Figura 163. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación: D50	176
Figura 164. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: D50	177
Figura 165. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: Ts	178
Figura 166. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación: Ts	178
Figura 167. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: Ts	179
Figura 168. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: LF	180

Figura 169. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación: LF	180
Figura 170. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: LF	181
Figura 171. Valores y diferencias entre promedios de la sala: T20	182
Figura 172. Valores y diferencias entre promedios de la sala: T30	182
Figura 173. Valores de los promedios por fuente: T20	183
Figura 174. Valores de los promedios por fuente: T30	183
Figura 175. Diferencias entre promedios por micrófono: T20	184
Figura 176. Diferencias entre promedios por micrófono: T30	184
Figura 177. Valores y diferencias entre promedios de la sala: EDT	185
Figura 178. Valores de los promedios por fuente: EDT	186
Figura 179. Diferencias entre promedios por micrófono: EDT	186
Figura 180. Valores y diferencias entre promedios de la sala: C80	187
Figura 181. Valores de los promedios por fuente: C80	188
Figura 182. Diferencias entre promedios por micrófono: C80	188
Figura 183. Valores y diferencias entre promedios de la sala: D50	189
Figura 184. Valores de los promedios por fuente: D50	190
Figura 185. Diferencias entre promedios por micrófono: D50	190
Figura 186. Valores y diferencias entre promedios de la sala: Ts	191
Figura 187. Diferencias entre promedios por fuente: Ts	192
Figura 188. Diferencias entre promedios por micrófono: Ts	192
Figura 189. Valores y diferencias entre promedios de la sala: LF	193
Figura 190. Diferencias entre promedios por fuente: LF	194
Figura 191. Diferencias entre promedios por micrófono: LF	194
Figura 192. Respuesta al impulso para el punto M3 de los altavoces: C (izquierda), F2 (centro) y RS (derecha)	195

Figura 193.	Respuesta al impulso para el punto M5 de los altavoces: C (izquierda), F2 (centro) y RS (derecha)	196
Figura 194.	Respuesta al impulso para el punto M8 de los altavoces: C (izquierda) y F2 (derecha)	196
Figura 195.	Respuesta al impulso para el punto M8 de los altavoces: LS (izquierda) y RS (derecha)	196
Figura 196.	Respuesta al impulso de RS para el punto M1 y M8 para ambos micrófonos	197
Figura 197.	Promedios de sala de mediciones y simulación: T20	216
Figura 198.	Promedios de sala de mediciones y simulación: T30	217
Figura 199.	Promedios de sala de mediciones y simulación: EDT	217
Figura 200.	Promedios de sala de mediciones y simulación: C80	217
Figura 201.	Promedios de sala de mediciones y simulación: D50	218
Figura 202.	Promedios de sala de mediciones y simulación: Ts	218
Figura 203.	Promedios de sala de mediciones y simulación: LF	218
Figura 204.	Promedios por fuente de mediciones y simulación: T20	219
Figura 205.	Promedios por fuente de mediciones y simulación: T30	219
Figura 206.	Promedios por fuente de mediciones y simulación: EDT	220
Figura 207.	Promedios por fuente de mediciones y simulación: C80	220
Figura 208.	Promedios por fuente de mediciones y simulación: D50	221
Figura 209.	Promedios por fuente de mediciones y simulación: Ts	221
Figura 210.	Promedios por fuente de mediciones y simulación: LF	222
Figura 211.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Pantalla): T20	222
Figura 212.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): T20	222
Figura 213.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Pantalla): T30	223

Figura 214.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): T30	223
Figura 215.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): EDT	223
Figura 216.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Omnidireccional): C80	224
Figura 217.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): C80	224
Figura 218.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (OMnidiereccional): D50	224
Figura 219.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): D50	224
Figura 220.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Pantalla): Ts	225
Figura 221.	Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): Ts	225

## Índice de tablas

Tabla. I.Características de los métodos de Trazado de Rayos y Fuentes Imagen	13
Tabla. II. Iluminación de la pantalla	16
Tabla. III.Reducción de ruido recomendada por banda de frecuencia entre locales	21
Tabla. IV.Relación entre el número de asientos de la sala y el número de posiciones de micrófono para realizar una medición correcta	27
Tabla. V.Hechos asociados a mediciones y simulaciones. Tabla traducida de “The ISO 3382 parameters: Can we simulate them? Can we measure them?” [41]	32
Tabla. VI. Resumen de las salas del complejo según su tamaño y capacidad	39
Tabla. VII. Materiales de la sala de estudio	43
Tabla. VIII.Características de los altavoces de la sala	44
Tabla. IX.Posiciones de la fuente omnidireccional en la sala, distancias a las superficies cercanas y coordenadas respecto al centro de la pantalla	49
Tabla. X.Posiciones del micrófono en la sala en numeración de la sala y en coordenadas respecto al centro de la pantalla	50
Tabla. XI.Posiciones de los altavoces de pantalla: altura y coordenadas respecto al centro de la pantalla	50
Tabla. XII.Posiciones de los altavoces de surround: altura y coordenadas respecto al centro de la pantalla	51
Tabla. XIII.Valores de los parámetros para la posición M8 y F3	54
Tabla. XIV.Coefficientes de Chauvenet	54
Tabla. XV.Superficies del modelo: Material inicial, dimensiones y superficie	56
Tabla. XVI.Materiales modificados en la segunda prueba de simulación	60
Tabla. XVII.Materiales modificados en la tercera prueba de simulación	61

Tabla. XVIII. Materiales modificados en la tercera prueba de simulación	63
Tabla. XIX. Diferencias [JND] entre los valores medidos y los valores simulados	65
Tabla. XX. Diferencias [JND] entre el promedio de T30 medido y simulado mediante AURA por posición de micrófono	66
Tabla. XXI. Valor de la relación impulso-ruido (INR) en las bandas que presentan niveles inferiores de los recomendados	71
Tabla. XXII. Valores de la relación impulso-ruido para las distintas combinaciones utilizando señal MLS	72
Tabla. XXIII. Valores de la relación impulso-ruido para las distintas combinaciones utilizando barrido de frecuencias	72
Tabla. XXIV. Valores de reverberación promedio de la sala	76
Tabla. XXV. Valores de C80, D50, Ts y LF promedios de la sala	78
Tabla. XXVI. T20 [s] por zonas medido con fuente omnidireccional	86
Tabla. XXVII. T30 [s] por zonas medido con fuente omnidireccional	86
Tabla. XXVIII. EDT [s] por zonas medido con fuente omnidireccional	87
Tabla. XXIX. C80 [dB] por zonas medido con fuente omnidireccional	88
Tabla. XXX. D50 [-] por zonas medido con fuente omnidireccional	88
Tabla. XXXI. Ts [ms] por zonas medido con fuente omnidireccional	89
Tabla. XXXII. LF [-] por zonas medido con fuente omnidireccional	90
Tabla. XXXIII. Valores globales de la sala junto al rango típico para salas de conciertos o salas polivalentes vacías hasta 25 000 m <sup>3</sup> . * Valor recomendado para la banda de 500 Hz según la SMPTE EG 18-1994	93
Tabla. XXXIV. Valor de la relación impulso-ruido (INR) en las bandas de octava que presentan niveles inferiores a 35 dB	94
Tabla. XXXV. Valor de la relación impulso-ruido en las bandas de tercio de octava para la señal MLS y los altavoces de pantalla que presentan niveles inferiores a 35 dB	94

Tabla. XXXVI. Valor de la relación impulso-ruido en las bandas de tercio de octava para MLS y los altavoces de surround que presentan niveles inferiores a 35 dB	95
Tabla. XXXVII. Valor de la relación impulso-ruido en las bandas de tercio de octava para la señal de barrido sinusoidal que presentan niveles inferiores a 35 dB	95
Tabla. XXXVIII. Valores de T20, T30 y EDT promedio de la sala medidos con barrido sinusoidal y el sistema de refuerzo sonoro	99
Tabla. XXXIX. Valores de C80, D50, Ts y LF promedio de la sala medidos con barrido sinusoidal y el sistema de refuerzo sonoro	100
Tabla. XLI. Valores de C80 [dB] y D50 [-] para distintas combinaciones de altavoces	104
Tabla. XLII. Valores de Ts [ms] para distintas combinaciones de altavoces	105
Tabla. XLIII. T20 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	113
Tabla. XLIV. T30 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	113
Tabla. XLV. EDT para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	115
Tabla. XLVI. C80 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	116
Tabla. XLVII. D50 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	117
Tabla. XLVIII. TS para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	119
Tabla. XLIX. LF para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	119
Tabla. L. Valores globales para la sala calculados a partir de todo el sistema de refuerzo sonoro, sólo los altavoces de pantalla y sólo el sistema de surround	124
Tabla. LI. Valores simulados de T20, T30 y EDT promedio de la sala	127
Tabla. LII. Valores de C80, D50, Ts y LF simulados con fuente omnidireccional	129
Tabla. LIII. T20 [s] por zonas simulado con fuente omnidireccional	133
Tabla. LIV. T30 [s] por zonas simulado con fuente omnidireccional	133

Tabla. LV.EDT [s] por zonas simulado con fuente omnidireccional	134
Tabla. LVI.C80 [dB] por zonas simulado con fuente omnidireccional	135
Tabla. LVII.D50 [-] por zonas simulado con fuente omnidireccional	135
Tabla. LVIII.Ts [ms] por zonas simulado con fuente omnidireccional	136
Tabla. LIX.LF [-] por zonas simulado con fuente omnidireccional	136
Tabla. LX. Valores globales para la sala simulados con fuente omnidireccional	142
Tabla. LXI.Valores de T20 simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces	144
Tabla. LXII.Valores de T30 simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces	145
Tabla. LXIII.Valores de EDT simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces	146
Tabla. LXIV.Valores de C80 simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces	147
Tabla. LXV.Valores de D50 simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces	148
Tabla. LXVI.Valores de Ts simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces	149
Tabla. LXVII.Valores de LF simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces	150
Tabla. LXVIII. T20 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	154
Tabla. LXIX.T30 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	155
Tabla. LXX. EDT para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	155
Tabla. LXXI. C80 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	157
Tabla. LXXII.D50 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	158
Tabla. LXXIII.TS para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	159



Tabla. LXXIV.LF para distintas posiciones y combinaciones de altavoces	160
Tabla. LXXV.Valores globales para la sala calculados a partir de la simulación con el sistema de refuerzo sonoro	166
Tabla. LXXVI.T20 promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas	207
Tabla. LXXVII.T30 promedio de la sala por bandas de tercio de octava	208
Tabla. LXXVIII.T20 promedio de la sala por bandas de tercio de octava	209
Tabla. LXXIX.T30 promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas	210
Tabla. LXXX.EDT promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas	211
Tabla. LXXXI.C80 promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas	212
Tabla. LXXXII.D50 promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas	213
Tabla. LXXXIII.Ts promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas	214
Tabla. LXXXIV.LF promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas	215
Tabla. LXXXV.Valores globales junto a sus incertidumbres	216



## Índice de ecuaciones

- (1) Integración de Schröder
- (2) Tiempo de reverberación medio ( $T_{med}$ ) calculado en banda de octava
- (3) Tiempo de reverberación medio ( $T_{med}$ ) calculado en banda de tercio de octava
- (4) Tiempo de reverberación inicial medio ( $EDT_{med}$ ) calculado en banda de octava
- (5) Tiempo de reverberación inicial medio ( $EDT_{med}$ ) calculado en banda de tercio de octava
- (6) Claridad musical ( $t_c=80$  ms) y claridad para la palabra ( $t_c=50$  ms)
- (7) Definición
- (8) Tiempo Central
- (9) Fracción de Energía Lateral
- (10) Fórmula de Sabine para el cálculo del tiempo de reverberación
- (11) Fórmula de Eyring para el cálculo del tiempo de reverberación
- (12) Coeficiente de absorción sonora medio de una sala
- (13) Ecuación de onda
- (14) Relación entre las dimensiones de la sala para un ajuste óptimo
- (15) Criterio de Chauvenet
- (16) Desviación típica según la norma UNE-EN ISO 3382-1
- (17) Desviación típica
- (18) Incertidumbre combinada y expandida



## Resumen

El objetivo principal de este trabajo fin de máster es la obtención de los parámetros acústicos, que especifica la norma UNE-EN ISO 3382-1, con una fuente omnidireccional y con cada uno de los canales del sistema de refuerzo sonoro (Izquierdo, Central, Derecho, Surround Izquierdo y Surround Derecho) en una sala de cine, así como la comparación de los resultados. La sala estudiada es la sala 6 de Kinopolis, que está situada en Pozuelo de Alarcón (Madrid). Es una sala de gran tamaño (8800 m<sup>3</sup>) que cuenta con 706 butacas.

Tras un estudio de la situación actual en la investigación de acústica de salas, se han realizado las mediciones de la respuesta al impulso con las distintas fuentes y con dos tipos de señal: Secuencias de Máxima Longitud (*Maximum Length Sequence - MLS*) y barridos sinusoidales. Además, se ha creado un modelo virtual de la sala con el software EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*). Los tiempos de reverberación son bastante bajos (aproximadamente 0,6 s en frecuencias medias) y los parámetros subjetivos indican gran definición y claridad. C80 es mayor a 10 dB para casi todas las bandas de frecuencia y D50 es superior a 0,8.

Con los datos obtenidos de las mediciones y la simulación se ha realizado un estudio comparativo en el que se incluye información acerca de cómo varían los parámetros acústicos en función del tipo de fuente utilizada, la fiabilidad del modelo creado o la calidad acústica de la sala. Además, presenta la posibilidad de realizar la medición de algunos de los parámetros acústicos con los altavoces del sistema de refuerzo sonoro, teniendo en cuenta las mejoras de los parámetros subjetivos con los altavoces de pantalla.



## Summary

The main objective of this Master's Dissertation is to measure some acoustic parameters, which are specified in UNE-EN ISO 3382-1, with an omnidirectional source and each channel sound reinforcement system (Left, Center, right, Surround Left and Surround Right) in a movie theater, and the comparison of results. The analyzed room is Kinopolis' room 6, which is placed in Pozuelo de Alarcón (Madrid). It is a large room (8800 m<sup>3</sup>) which has 706 seats.

After the state of the art in room acoustics research, room's impulse responses have been measured with two types of signal: Maximum Length Sequence (MLS) and Logarithmic Frequency Sine Sweep. In addition, a virtual model of the room has been created with EASE software (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers). Reverberation times are quite low (about 0.6 s at mid frequencies) and subjective parameters indicate high definition and clarity. C80 is greater than 10 dB for almost all frequency bands and D50 is greater than 0.8.

The data obtained from both the measurements and the simulation has been analyzed in order to include a comparative study with information about the acoustic parameters variation depending on the type of acoustic source, the reliability of the model created or the acoustic quality of the room. Furthermore, it presents the possibility of measuring some acoustical parameters with sound reinforcement system, taking into account improvements in subjective parameters when you are measuring with screen channels.





# 1

## **Introducción**



En este Trabajo Fin de Máster se presentan los resultados de un estudio acústico y comparativo de una sala de cine, en concreto, la sala 6 de Kinépolis Madrid. Las salas de cine, como se explicará en el apartado teórico, están marcadas por las exigencias acústicas y de confort que establecen la norma SMPTE EG-18:1994 [1] y la guía para la certificación THX [2]. A parte de un tiempo de reverberación bajo o unas superficies muy absorbentes, una de las características principales de las salas de cine es que siempre se utiliza el sistema electroacústico activo, ya que no es habitual escuchar a un orador realizando una conferencia. Por ello se ha realizado el estudio acústico de cuatro modos:

- La medición in situ de la respuesta impulsiva de la sala con una fuente omnidireccional según la norma UNE-EN ISO 3382-1 [3].
- La medición in situ de la respuesta impulsiva de la sala con el sistema de refuerzo sonoro de la sala utilizando los 5 canales de la sala (Izquierdo, Central, Derecho, Surround Izquierdo y Surround Derecho).
- La simulación de la sala y la obtención de los parámetros acústicos con fuente omnidireccional con el *software* EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*) [4].
- La simulación de la sala y la obtención de los parámetros acústicos con el sistema de refuerzo sonoro con el *software* EASE.

Antes de empezar con las mediciones y la simulación se ha realizado un pequeño estudio del estado actual en la investigación de acústica de salas y medida de parámetros acústicos, el cual servirá como punto de partida para la realización del resto del trabajo.

Tras este pequeño estudio, se han preparado los cuatros estudios acústicos cuyos resultados se presentan de manera individual. Posteriormente, se ha procedido a la comparación de los mismos, viendo como varían los parámetros en función de la posición o tipo de altavoz utilizado, si la calidad acústica de la sala mejora al realizar las mediciones con el sistema de refuerzo sonoro, cuál es la diferencia entre los valores de los parámetros en los distintos casos, etc.

Con todo esto se cumplen los objetivos planteados en la solicitud de este trabajo:

- Medir los parámetros acústicos de una sala de cine con una fuente omnidireccional y con el sistema de refuerzo sonoro de la sala.
- Obtener los mismos parámetros mediante la simulación de la sala.
- Comprobar como varían estos parámetros y si hay alguna relación entre ellos.
- Intentar obtener algunas conclusiones en cuanto al uso del refuerzo sonoro de las salas para caracterizarlas.

# **2**

## **Conceptos teóricos**



## 2.1. La norma UNE-EN ISO 3382-1 y sus parámetros

La medida de parámetros acústicos en recintos se lleva a cabo a partir de las indicaciones de la norma UNE-EN ISO 3382 que consta de tres partes:

- Parte 1: Salas de espectáculos (2010) [1]
- Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios (2008) [6]
- Parte 3: Oficinas diáfanos (2012) [7]

En esta introducción teórica se tratarán únicamente algunos aspectos de la parte 1 cuyas características no se abordan en otros puntos de la memoria.

### 2.1.1. Métodos de medida

La norma recoge dos métodos de medida basados en el tipo de señal de excitación de la sala: el método del ruido interrumpido y el método de respuesta impulsiva integrada. El rango de frecuencias que se deben cubrir son las bandas de octava 125 Hz a 4000 Hz para ambos métodos.

El método del ruido interrumpido consiste en la obtención de curvas de decrecimiento del nivel de presión sonora de una sala mediante la excitación de la misma con un ruido de banda ancha aleatorio o pseudoaleatorio; habitualmente se emplea ruido rosa por tener un nivel espectral constante por bandas de 1/n octavas. Se realiza la excitación de la sala hasta que ésta alcanza el estado estacionario, momento en el que se para la fuente y se recoge la caída de nivel. El nivel en estado estacionario ha de estar 35 dB o 45 dB por encima del nivel del ruido de fondo para poder garantizar la medida del tiempo de reverberación de la sala. Es necesaria la toma de varias curvas de caída en cada punto de medida para la obtención correcta del tiempo de reverberación.

En el método de la respuesta impulsiva integrada la señal de excitación ideal es un impulso o delta de Dirac. A partir de él y mediante la integración inversa de la respuesta de la sala al cuadrado (integral inversa de Schröder – (1)) para cada banda de octava o tercio de octava se obtienen las curvas de decrecimiento. Al ser imposible generar una delta perfecta, se utilizan salvas (*burst*), barridos sinusoidales o secuencias de longitud máxima (*Maximum Length Sequence* - MLS) para excitar la

sala. De nuevo es necesario un margen dinámico de 35 dB o 45 dB entre el nivel de pico y el valor del ruido de fondo.

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_{\infty}^t p^2(\tau) d(-\tau) \quad (1)$$

## 2.1.2. Parámetros acústicos

En este apartado sólo se van a incluir aquellos parámetros acústicos que han sido medidos durante este trabajo aunque la norma incluye otros como son la Fuerza Sonora (G) o la Función de Correlación Cruzada Interaural (IACC).

### 2.1.2.1. Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación (T) siempre ha sido considerado uno de los parámetros más importantes en acústica de salas. Representa la persistencia de la energía acústica en el recinto, lo que definió W. C. Sabine como el tiempo que ha de transcurrir para que la energía pase de un valor inicial hasta la millonésima parte de éste, es decir, disminuya 60 dB desde que apague la fuente sonora. Los recintos con T elevados se denominan recintos vivos o brillantes, mientras que si T es bajo se consideran recintos secos o apagados.

Cuando se está midiendo en un recinto no siempre es posible obtener unas diferencias entre el nivel de señal y el ruido de fondo tan amplias, ya que es necesario dejar un pequeño margen desde el momento de apagar la fuente (5 dB) y un margen hasta el ruido de fondo (10 dB). Habitualmente, se mide el tiempo de reverberación para caídas menores 20 dB o 30 dB ( $T_{20}$  y  $T_{30}$ ) y se calcula como sería la caída para 60 dB, siendo  $T_{20}$  el tiempo que tarda la energía en caer 20dB multiplicado por 3 y  $T_{30}$  el tiempo que tarda en caer 30 dB multiplicado por 2.

Es uno de los parámetros más estables y se suele promediar por bandas de frecuencia todas las medidas realizadas en un recinto. Además de obtener un valor único ( $T_{20,med}$  y  $T_{30,med}$ ) promediando las bandas de frecuencias medias según las ecuaciones (2) y (3).

$$T_{X,med} = \frac{T_{X,500Hz} + T_{X,1000Hz}}{2} \quad (2)$$

$$T_{X,med} = \frac{T_{X,400Hz} + T_{X,500Hz} + T_{X,630Hz} + T_{X,800Hz} + T_{X,1000Hz} + T_{X,1250Hz}}{6} \quad (3)$$



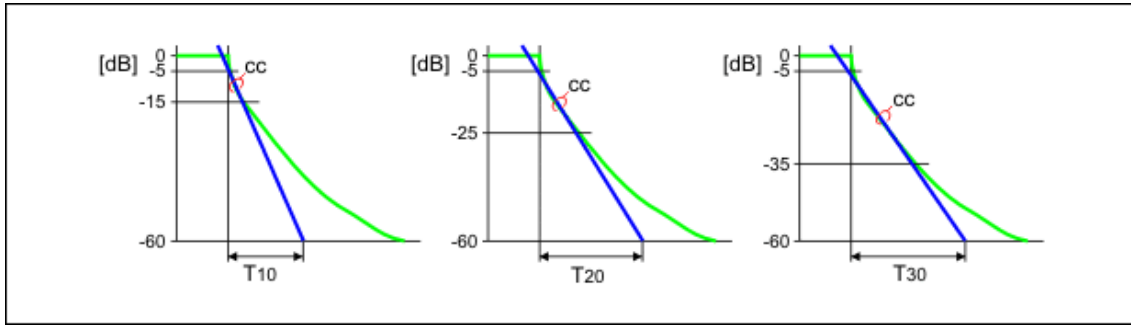


Figura 1. Curvas de decrecimiento de energía para las medidas del tiempo de reverberación ( $T_{10}$ ,  $T_{20}$  y  $T_{30}$ ) [5]

#### 2.1.2.2. Tiempo de reverberación inicial (EDT)

El tiempo de reverberación inicial o tiempo de caída inicial (*Early Decay Time*) es el tiempo que tardaría la energía en caer 60 dB calculado a partir de la pendiente de caída de los primeros 10 dB tras apagar la fuente sonora. En una sala con difusión homogénea del sonido, la curva de decrecimiento es prácticamente lineal y no habrá diferencia entre los valores del  $T$  y de EDT. En cambio con distribuciones no uniformes de la absorción, los valores de EDT son generalmente menores que los del  $T$ .

EDT está relacionado con la reverberación percibida por los oyentes y está muy influenciada por las reflexiones iniciales. Si se obtienen valores menores que  $T$ , la sala será subjetivamente más apagada para la música pero más inteligible para la voz.

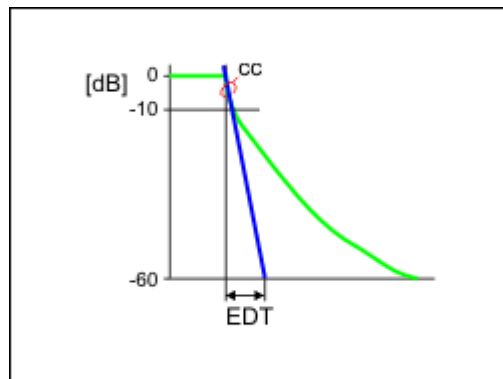


Figura 2. Curva de decrecimiento para el cálculo del Tiempo de reverberación inicial (EDT) [5]

Se puede realizar el promedio de las frecuencias medias para obtener un valor único de EDT según las ecuaciones (4) y (5). El rango típico de este parámetro calculado a partir de valores promedios en salas de conciertos y salas polivalentes está entre 1,0 s y 3,0 s.

$$EDT_m = \frac{EDT_{500Hz} + EDT_{1000Hz}}{2} \quad (4)$$

$$EDT_m = \frac{EDT_{400Hz} + EDT_{500Hz} + EDT_{630Hz} + EDT_{800Hz} + EDT_{1000Hz} + EDT_{1250Hz}}{6} \quad (5)$$

### 2.1.2.3. Claridad (C80)

La claridad relaciona la cantidad de energía sonora inmediata que se produce dentro de los primeros 50ms, para la Voz, y 80ms, para la Música, respecto a la energía sonora tardía que se produce después de transcurridos los 50 o 80ms (6). Está directamente relacionado con la nitidez o claridad de los sonidos en la sala y el predominio del sonido inicial frente al final proporcionará un valor alto para C80. Se puede obtener un valor único promediando las bandas de 500 Hz y 1000 Hz en octavas o de 400 Hz a 1250 Hz en tercios de octava.

Según Arau [8] para las salas de conciertos debe tomar valores entre -2 dB y 4 dB, para salas de ópera entre 2 dB y 6 dB y para salas de teatro mayores de 6 dB.

$$C_{t_c} = 10 \log \frac{\int_0^{t_c} p^2(t) dt}{\int_{t_c}^{\infty} p^2(t) dt} [dB] \quad (6)$$

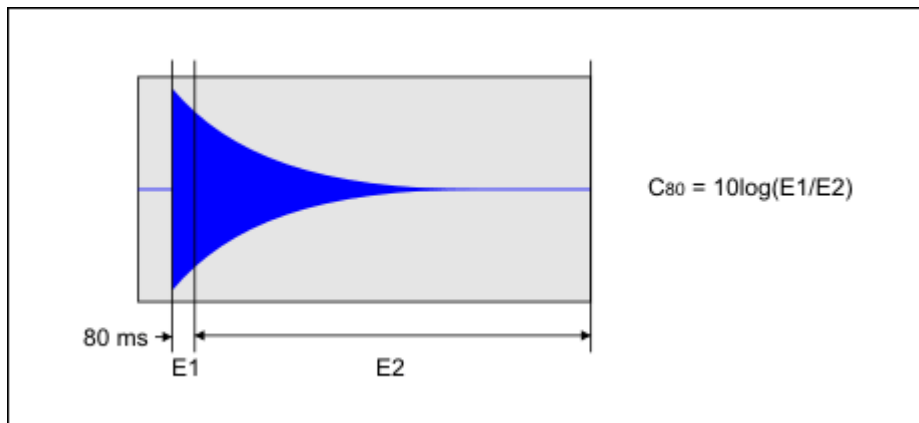


Figura 3. Respuesta al impulso para la medida de la Claridad (C80) [5]

### 2.1.2.4. Definición (D50)

La Definición relaciona la energía acústica precoz (50 ms) con la energía total de la respuesta impulsiva. Se consigue gran impresión de definición con valores altos de este parámetro lo que conlleva que los sonidos serán más claros para el receptor y será mayor la inteligibilidad. Por el contrario un valor bajo de la definición hace que el

recinto se perciba como poco íntimo, lo cual se puede deber a un exceso de reverberación.

Una sala de conciertos debe presentar unos valores de D50 inferiores a 0,50 para el promedio de las bandas de 500 Hz y 1000 Hz; si D50 aumenta la sensación subjetiva es de empeoramiento de la calidad sonora. En salas para la palabra se recomiendan valores superiores a 0,65 y en salas de ópera valores intermedios entre 0,50 y 0,65.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \quad (7)$$

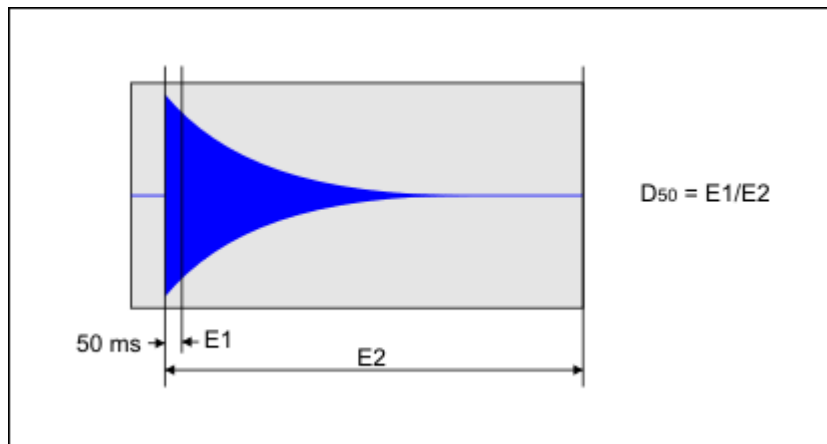


Figura 4. Respuesta al impulso para la medida de la Definición (D50) [5]

#### 2.1.2.5. Tiempo central (Ts)

El Tiempo Central (Ts) indica el instante de tiempo donde la energía sonora acumulada es igual a la energía sonora del tiempo restante de la medida. Es el tiempo del centro de gravedad de la respuesta impulsiva cuadrática (8). Se mide y promedia en los mismos intervalos que los parámetros anteriores (400 Hz a 1250 Hz). Suele tomar valores entre 60 ms y 260 ms en salas de conciertos.

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \quad (8)$$

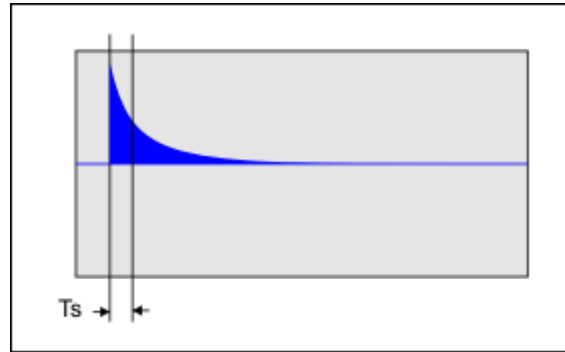


Figura 5. Respuesta impulsiva cuadrática para la medida del Tiempo Central (Ts) [5]

#### 2.1.2.6. Fracción de Energía Lateral (LF)

La Fracción de Energía Lateral (LF) se mide a partir de la relación de las respuestas impulsivas de un micrófono omnidireccional (los primeros 80 ms) y un micrófono bidireccional (desde 5 ms a 80 ms) (9). El eje de captación mínima del micrófono bidireccional debe apuntar a la posición de la fuente para que sólo capte la energía que proviene de los laterales y no el sonido directo. Está directamente relacionado con la Anchura Aparente de la Fuente (*Apparent Source Width* – ASW), que indica cómo perciben los espectadores la imagen sonora respecto al ancho de la fuente real. Para obtener un valor único del recinto se promedian las bandas entre 125 Hz y 1000 Hz.

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_{bidi}^2(t) dt}{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt} \quad (9)$$

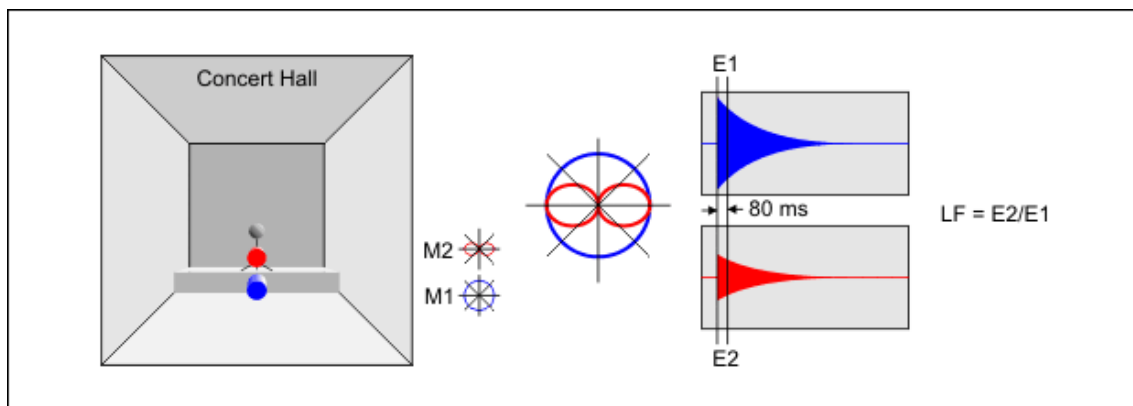


Figura 6. Respuesta impulsiva de los micrófonos bidireccional y omnidireccional para la medida de la Fracción de Energía Lateral (LF) [5]

## 2.2. Modelado por ordenador: EASE

El estudio de las salas por ordenador se basa en las tres teorías de la acústica arquitectónica:

- Teorías estadística
- Teoría geométrica
- Teoría ondulatoria

En los siguientes apartados se va a explicar brevemente en que consiste cada una de las teorías y como se aplican en este campo, especialmente para el programa EASE (*Enhanced Acoustic Software for Engineers AFMG*®) [4].

### 2.2.1. Teoría estadística

Se basa en la suposición de que en una sala se genera un campo sonoro difuso, cuyas características son:

- Todas las direcciones de las ondas reflejadas son igualmente probables.
- La energía en un punto es la suma aritmética de los valores medios de las energías de todas las ondas que pasan a dicho punto.
- La densidad de energía en un instante de tiempo es la misma en cualquier punto del recinto, es decir, no existe dependencia de las posiciones de fuente y receptor.

Teniendo en cuenta esto y a partir de cálculos sencillos se pueden obtener los valores del tiempo de reverberación, aislamiento, coeficientes de absorción, etcétera. Sirve para obtener una aproximación a las características acústicas de la sala ya que en las salas reales no existe el campo sonoro difuso y pueden aparecer reflexiones que sean perjudiciales en algunos puntos de la sala.

EASE permite calcular el tiempo de reverberación utilizando de los datos geométricos de la sala (volumen y superficie) y los coeficientes de absorción de los materiales a partir de las fórmulas de Sabine (10) y Eyring (11). No se pueden utilizar estas fórmulas en todos los casos. Si el valor del coeficiente de absorción sonora

medio es menor de 0,2 se usa la expresión de Sabine, cuando es mayor de 0,2 se usa la expresión de Eyring.

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{\bar{\alpha} \cdot S_T} \quad (10)$$

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{-S_T \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (11)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S_T} = \frac{\sum \alpha_k \cdot S_k}{\sum S_k} \quad (12)$$

### 2.2.2. Teoría geométrica

La teoría geométrica no idealiza el campo sonoro con un modelo estadístico, no será homogéneo en toda la sala, y lo considera como una composición de rayos discretos trazados según las leyes de la acústica geométrica (difracción, reflexión y refracción). Se calculará la energía sonora en un punto como la combinación de las energías de los rayos que lleguen a él teniendo en cuenta el camino recorrido, el número de reflexiones y las pérdidas en cada reflexión. Al poseer toda la información de cada rayo se obtienen datos más fiables y permite encontrar aquellas reflexiones que pueden resultar perjudiciales para una buena acústica. Esta teoría está limitada a longitudes de onda pequeñas comparadas con las superficies de la sala y a longitudes de onda grandes comparadas con la rugosidad de las superficies de las salas.

El estudio acústico por ordenador basado en la teoría geométrica se lleva a cabo mediante métodos de trazado de rayos, de fuentes imagen o híbridos, cuya diferencia fundamental es el proceso de cálculo de las trayectorias. El método de fuentes imagen encuentra todas las trayectorias posibles entre un emisor y un receptor mediante la búsqueda de fuentes imaginarias o espejo (ver Figura 7) y el método de trazado lanza un número de rayos establecido de manera aleatoria desde la fuente sonora. EASE utiliza los tres métodos para el cálculo de los parámetros ya que posee herramientas de Trazado de Rayos (*Ray Tracing*), Fuentes Imagen (*Mirror Image*) o Híbridos (AURA). Se presentan más características de los dos primeros métodos en la Tabla. I.

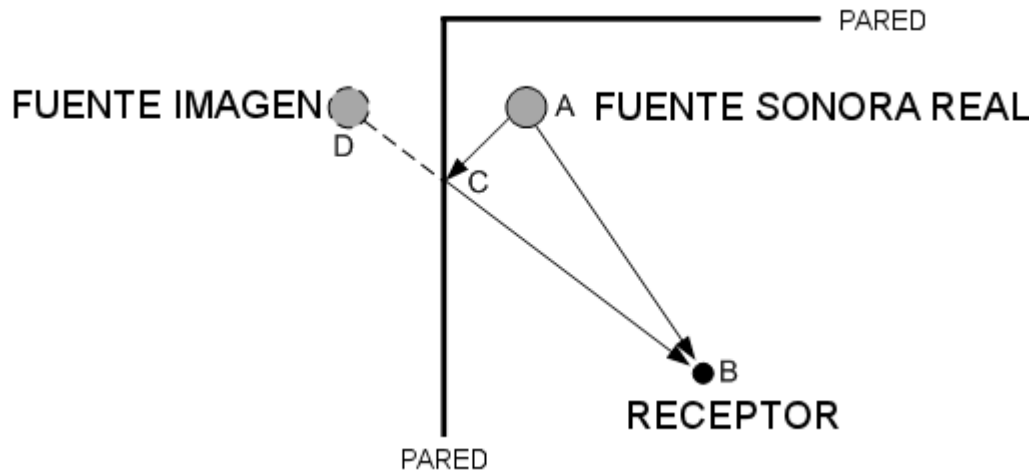


Figura 7. Teoría geométrica: fuentes imagen

	Fuente Imagen	Trazado de Rayos
Cálculo de trayectorias	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Busca todas las fuentes imagen</li> <li>- Dibuja trayectorias rectas entre fuente y receptor.</li> <li>- Comprueba la visibilidad: el camino entre la imagen y el receptor debe cruzar todas las superficies implicadas en la generación de la imagen y no otras, y la última pared debe ser una pared física</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sale un rayo de la fuente sonora y viaja por la sala.</li> <li>- Cambia de dirección y pierde energía en cada choque.</li> <li>- Llega al receptor con una determinada energía y en un instante de tiempo concreto.</li> </ul>
Limitado por	Caída de energía, orden de reflexión o tiempo de llegada	Caída de energía, orden de reflexión o tiempo de llegada
Receptor	Punto	Cubo o esfera
Tipo de reflexión	Especular	Especular o difusa
Nº Rayos/altavoz	--	Entre 25 y 100 veces el número de superficies.
Tiempo de cálculo	Elevado depende de la complejidad de la sala y el orden máximo.	Intermedio depende del número de rayos.

Tabla. I. Características de los métodos de Trazado de Rayos y Fuentes Imagen

Los métodos híbridos combinan los dos métodos anteriores. Normalmente las primeras reflexiones se calculan buscando las fuentes imagen ya que se necesita mayor precisión en ellas y las reflexiones de orden superior se calculan mediante trazado de rayos.

### 2.2.3. Teoría ondulatoria

La teoría ondulatoria esta basada en la propagación de las ondas en el espacio y estudia el progreso de las ondas en un recinto, lo cual permite conocer la naturaleza del campo sonoro en el interior. Este campo sonoro vendrá dado por la solución de la ecuación de onda (13). Dependiendo de las dimensiones de la sala, el espectro de las frecuencias de resonancia puede resultar demasiado complejo.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

El estudio en ordenador bajo esta teoría está limitado a recintos pequeños y para bajas frecuencias, obteniendo resultados muy precisos para una frecuencia determinada. Existen tres métodos de trabajo: método de elementos finitos (*Finite Element Method* - FEM) que divide el volumen en elementos más sencillos, método de elementos de contorno (*Boundary Element Method* - BEM) que divide las superficies en superficies más simples y método de diferencias finitas (*Finite Difference Time Domain* - FDTD) que sustituye las derivadas de la ecuación de ondas por diferencias finitas. EASE no está diseñado para utilizar los métodos ondulatorios.

## 2.3. Salas de cine

Se van a explicar las características de las salas de cine (la pantalla, las dimensiones de la sala, las butacas, etcétera) a partir de los contenidos de la norma SMPTE EG 18-1994 [1] y la guía de THX [2]. Ambas proponen unas pautas para que la sala de cine tenga buenas características acústicas y sea confortable para el espectador explicando desde las dimensiones de la pantalla hasta cómo deben ser las marquesinas de información.

En cuanto a estas últimas, no se va a entrar en detalle ya que no son acústicamente relevantes pero si se van a enumerar algunas de ellas para mostrar su índole:

- Los cines deben estar preparados para solucionar posibles interrupciones y si son más de 5 minutos dar explicaciones a la audiencia.
- Las marquesinas y paneles exteriores deben tener título correctamente escritos e iluminados por la noche.



- Las taquillas deben estar cerca de la entrada principal y tener toda la información acerca de las películas (horarios, formatos y precio).
- Las salas deben disponer de luces de techo o pared y luces de suelo en los pasillos las cuales deben atenuarse antes de comenzar la proyección y encenderse gradualmente durante los créditos.
- El personal debe ser eficiente, cortés, limpio y fácilmente identificable.

### **2.3.1. Proyección de las películas y pantalla**

La proyección de películas de cine puede realizarse en formatos analógicos (carretes de 35 mm o 70 mm) o digitales, que son los utilizados en la actualidad. Ninguna de los soportes debe presentar daños para una correcta exhibición exigiéndose que no tengan problemas severos de rasguños, empalmes o suciedad en el carrete durante el primer mes (analógicos) o que el sistema de compresión utilizado al digitalizar la señal no tenga pérdidas visibles por compresión, bordes no definidos, ruido, etcétera (digitales). Es necesaria la correcta proyección de los siguientes tamaños de imagen sin recortes en las mismas:

- 35 mm “Flat Image” (1.85:1) → 11,33 mm x 20,96 mm
- 35 mm “Scope Image” (2.35:1) → 17,78 mm x 21,31 mm
- 70 mm (2.2:1) → 22,10 mm x 48,56 mm

La iluminación de la pantalla debe tener unos valores mínimos de luminancia en el centro de la pantalla entre 12 fL (foot-Lambert) y 16 fL dependiendo del tipo de proyección. Estos valores marcarán el valor necesario en los laterales que estará entre el 75% y el 90% del valor central. La distribución de la iluminación debe ser simétrica. En cuanto al valor de la temperatura del color blanco será 5400 K para el formato analógico y 6400 K para el digital. Los valores exactos para cada formato se incluyen en la Tabla. II.

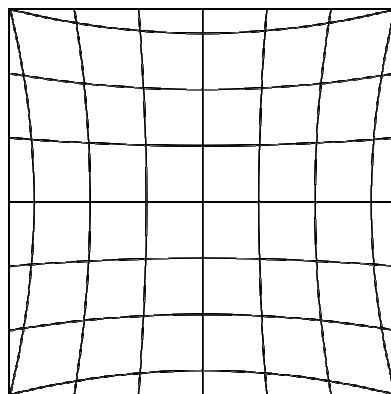
	Analógico	Digital
Luminancia (centro de la pantalla)	16fL $\pm$ 2fL 54,8 cd/m <sup>2</sup> $\pm$ 6,8 cd/m <sup>2</sup>	12fL $\pm$ 1fL 41,1 cd/m <sup>2</sup> $\pm$ 3,4 cd/m <sup>2</sup>
Distribución iluminación	>10 fL > 34,2 cd/m <sup>2</sup>	>9 fL > 30,8 cd/m <sup>2</sup>
Punto blanco	5400 K + 600° -200°	6400 K $\pm$ 300°

Tabla. II. Iluminación de la pantalla

Por otro lado, se establecen límites para la resolución o nitidez aparente y para las posibles inestabilidades durante la proyección. La nitidez aparente medida como la capacidad de reproducción de un grupo de líneas negras y blancas está establecida en función de la zona de la pantalla y medida en pares de líneas por milímetro. Debe ser más alta en la parte central (68 *line pairs per mm*), intermedia en los laterales (56 lp/mm) y menor en las esquinas (40 lp/mm). En el caso de imagen digital, se realiza un test THX donde se mide la función de transferencia de modulación y a partir de ellas se establecen los mínimos en 90% MTF, 80% MTF y 75% MTF a 25 lp/mm para las zonas central, laterales y esquinas respectivamente. Los límites de las inestabilidades por movimientos verticales (saltos) u horizontales (entrelazados) están fijados en un 0,20% (0,10% en digital) y 0,25% (0,15%) respectivamente.

Una vez colocado el proyector apuntando al centro de la pantalla, la distorsión de la imagen debida al ángulo de proyección vertical u horizontal no debe superar el 5% siendo recomendable que no supere el 3%.

Las relaciones de aspecto para las distintas proyecciones marcarán en gran medida tanto el tamaño de la pantalla como el tamaño de la sala. La pantalla debe ser lo más grande posible ocupando prácticamente toda la anchura de la pared frontal de la sala, se recomienda una relación 1.5:1 entre las alturas de la pared y la pantalla, una distancia entre 1,22 m y 1,83 m de la pantalla al suelo y con ejes paralelos. A su vez, si los laterales están curvados se evitará que los lados de la imagen se curven (efecto "*pin cushion*" o efecto cojín) como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Efecto cojín o *pincushion*

En cuanto a su material, debe ser blanco para evitar modificaciones en los colores, perforado para una buena calidad acústica ya que los altavoces irán colocados tras ella y no debe presentar ninguna rasgadura o costura visible que puede molestar durante la proyección. Es importante que nada pueda reflejar luz a la audiencia durante la proyección y la impida ver correctamente la película. Por ello, tanto las máscaras para cambios de formato como la pared tras la pantalla deben estar pintado de negro y no ser materiales reflectantes. Además las entradas y salidas deben colocarse de manera que la pantalla no reciba la luz del exterior de la sala durante la reproducción de la película.

### 2.3.2. Geometría

La geometría de la sala de cine viene marcada por tres aspectos fundamentales: el tamaño de la pantalla, el número de butacas y los ángulos de visión desde las mismas. Para que los espectadores se encuentren cómodos se recomienda que la sala cuente con 5,6 m<sup>3</sup> de volumen de aire por butaca, a partir de esto se establece un volumen mínimo de las sala.

Para un formato de proyección 2,35:1, la relación entre las distintas dimensiones del cine, para un ajuste al tamaño “óptimo”, se pueden obtener de la Figura 9. El área sombreada indica la zona donde deben estar la mayoría de las salas y el punto se considera la relación de dimensiones óptima. En las siguientes ecuaciones se presentan estas relaciones ideales.

$$\begin{array}{lcl}
 \frac{Ancho_{pantalla}}{Alto_{pantalla}} = \frac{2,35}{1} & \frac{Alto_{pared\_delantera}}{Alto_{pantalla}} = \frac{1,5}{1} & \\
 \frac{Longitud_{sala}}{Ancho_{sala}} = \frac{1,53}{1} & \frac{Altura_{sala}}{Ancho_{sala}} = \frac{0,68}{1} & (14)
 \end{array}$$

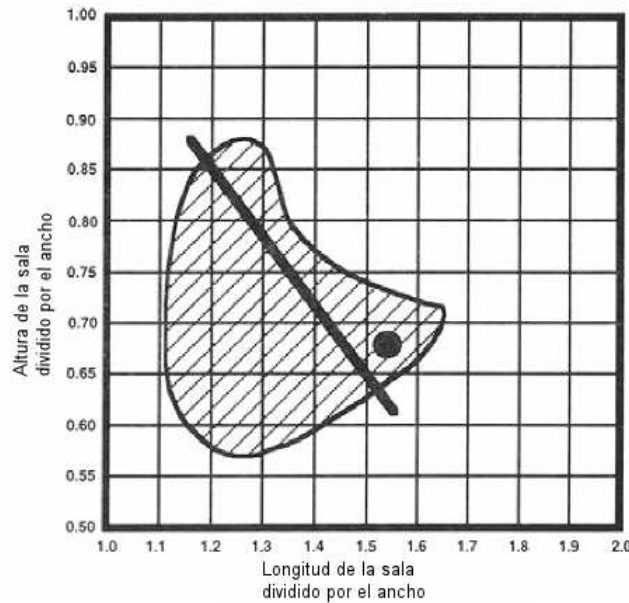


Figura 9. Relación entre las dimensiones de un sala de cine

A la hora de construir la sala, el suelo debe tener una pendiente tal que todos los asientos permitan una línea de visión directa a la pantalla sin obstrucción. Esa pendiente será menor de  $5^\circ$  para las salas tradicionales, entre  $5^\circ$  y  $15^\circ$  para salas en pendiente y entre  $15^\circ$  y  $25^\circ$  para salas tipo estadio. Según estas pendientes, el escalón entre filas estará entre 15,2 cm y 20,3 cm para los dos primeros casos y entre 30,4 cm y 38,1 cm para el último.

La distribución de las butacas será mediante un número de filas paralelas que deben curvarse en los laterales para que el ángulo de visión no sea excesivo. El campo de visión de un ser humano marca cuando una imagen se presenta demasiado grande o demasiado pequeña debiendo abarcar más de  $15^\circ$  en el plano vertical o  $30^\circ$  en el horizontal. Además, si el ángulo de visión es mayor de  $45^\circ$  desde el centro de la pantalla en el plano horizontal provoca el cambio de formas en la visión, es decir, ver elipses donde deben aparecer círculos. Por todo esto, se deben comprobar el ángulo de visión horizontal desde el asiento más alejado (mínimo  $26^\circ$ , recomendado  $36^\circ$ ) y desde la primera fila (inferior a  $80^\circ$ ), así como el ángulo de visión vertical desde la primera fila (menor de  $35^\circ$ ).

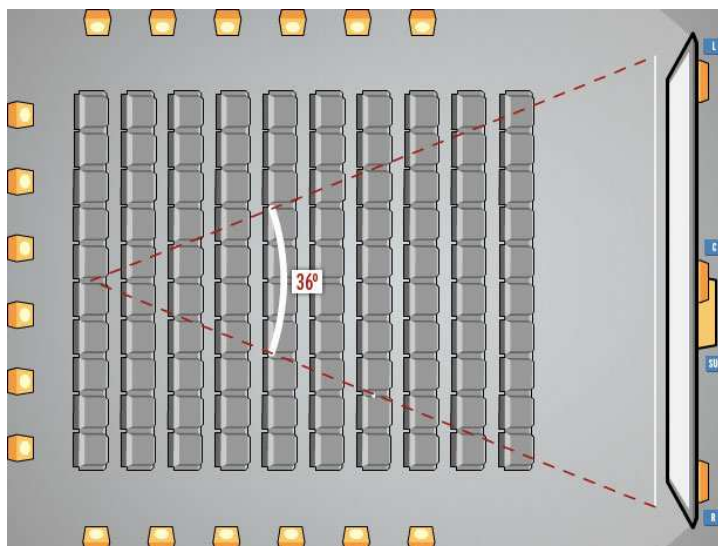


Figura 10. Ángulo de visión desde el fondo de la sala [9]

La separación entre las distintas filas debe ser entre 91,4 cm y 101,6 cm con una anchura de las butacas entre 48,3 cm y 53,3 cm. Cada fila debe tener un máximo de 14 o 15 asientos con dos pasillos laterales, siempre que sea posible no se deben sacrificar las mejores posiciones de la sala poniendo un pasillo central.

Por último, se deben evitar cualquier elemento que pueda distraer a la audiencia durante la proyección como son luces decorativas y superficies reflectantes o con altos valores de cromaticidad. Las indicaciones de salidas de emergencia deben estar visibles y serán en todo caso un elemento distractor, pero no reflejar luz hacia la audiencia.

### 2.3.3. Acústica

A la hora de acondicionar las salas de cine hay que tener especial atención a los ecos, las resonancias o las cancelaciones indeseadas que puedan colorear el sonido, así como al ruido de fondo.

El ruido de fondo está originado principalmente por el sistema de aire acondicionado de la sala, aunque existen otras fuentes como la audiencia, el sistema de sonido (problemas de zumbidos, chasquidos...) o el ruido exterior. Si el sistema de refrigeración de la sala no está instalado correctamente puede provocar vibraciones, transmisiones por conductos mal sellados, etcétera. Por lo tanto, es necesario incluir codos para tener atenuaciones, forrar los conductos con fibra de vidrio o sellar bien los conductos para evitar fugas. Está permitido un nivel máximo de ruido correspondiente a la curva NC-30 (*Noise Criterion Curve*) que se muestra en la Figura 11. En la

actualidad, según lo recogido en las nuevas recomendaciones de DCI, se sugiere que se diseñe de acuerdo a curvas NC-25 y o NC-20.

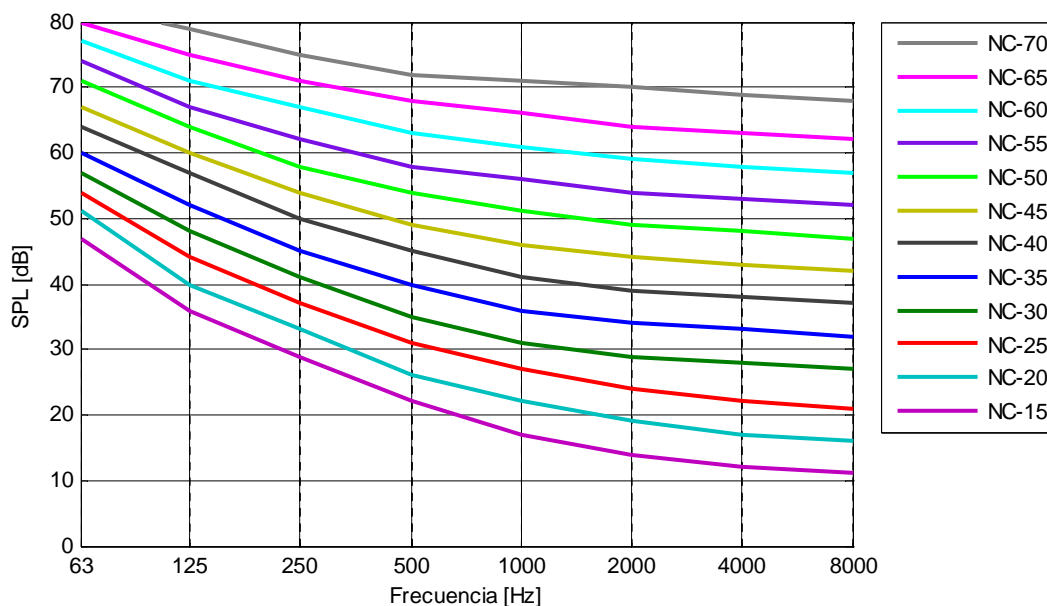


Figura 11. Curvas NC para la valoración del ruido de fondo

El ruido exterior hay que evitarlo cumpliendo las exigencias de la guía de THX que indica un aislamiento mínimo que cumpla la curva STC-65 (*Sound Transmision Class*) (Figura 12) o la norma SMPTE incluye una tabla con los valores mínimos (Tabla. III).

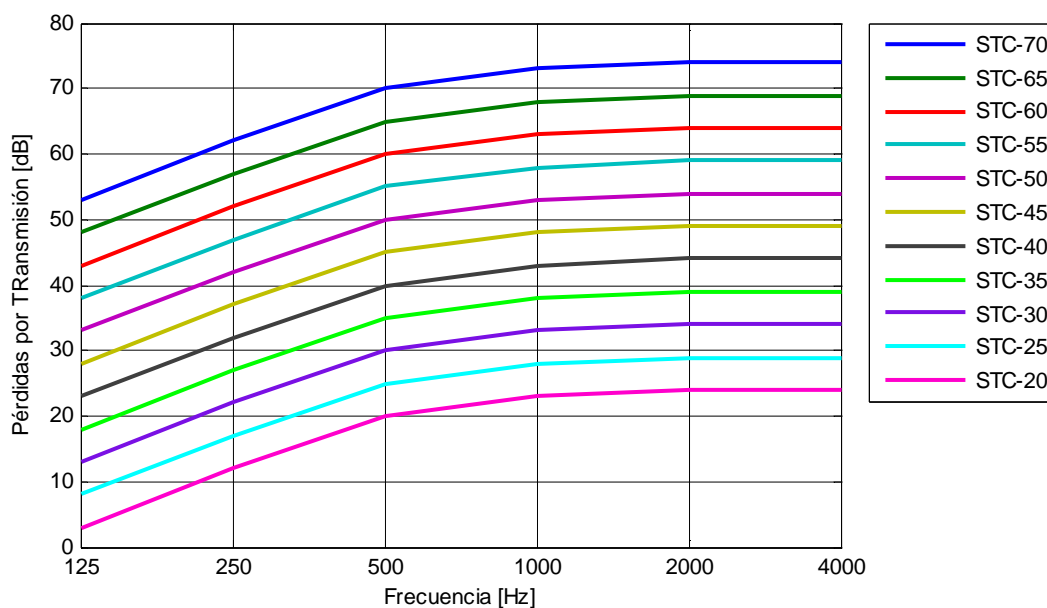


Figura 12. Curvas STC para la valoración del aislamiento entre salas

Frecuencia [Hz]	31,5	63	125	500	1000	2000	4000	8000
Reducción Recomendada [dB]	38	48	52	66	66	66	66	66

Tabla. III. Reducción de ruido recomendada por banda de frecuencia entre locales

El tiempo de reverberación de la sala debe estar en el rango entre 0,5 s y 2 s, aunque dependiendo del volumen de la sala se recomienda un valor según la Figura 13 para la banda de octava de 500Hz. En el resto de bandas debe ser lo más lineal posible, sin grandes variaciones en frecuencias. Una excesiva reverberación en alguna banda de frecuencias podría repercutir en la inteligibilidad del diálogo (frecuencias medias) o provocar sonidos retumbantes (frecuencias bajas) o sibilantes (frecuencias altas).

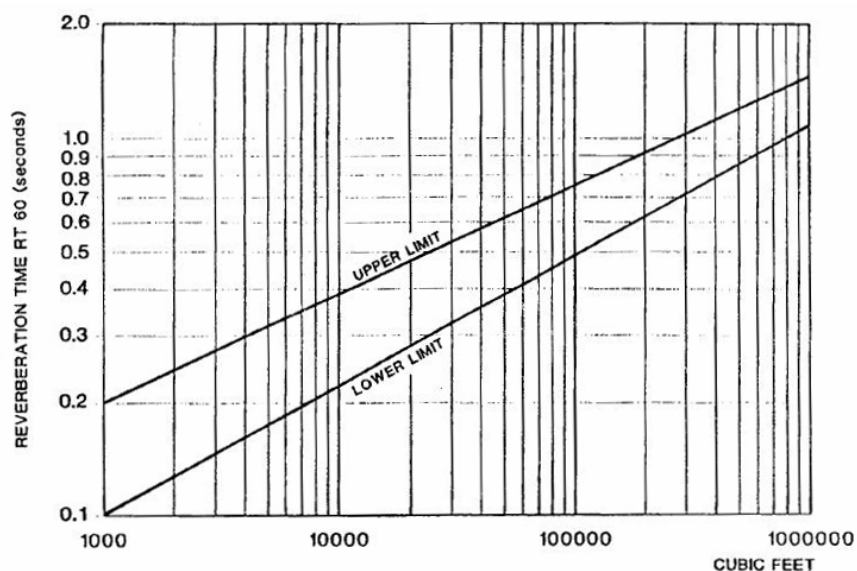


Figura 13. Tiempo de Reverberación en la banda de 500 Hz para salas de cine

Para controlar la reverberación y lo ecos indeseados, las distintas superficies de la sala han de llevar un tratamiento especial. Las paredes laterales no deberían ser totalmente paralelas para evitar modos propios y deben tener como mínimo 1" de fibra de vidrio con 1" o 2" de cámara de aire. La pared trasera debe llevar mayor absorción que las laterales (mínimo 2" de fibra de vidrio con cámara de aire) para evitar que los diálogos parezcan provenir de atrás debido a las reflexiones. Además, en esta pared se encuentra la ventana de proyección que debería ser de vidrio de doble capa colocado con un ángulo de 7° del lado del proyector para que la imagen no se refleje en la lente e inclinado del lado de la sala para que no se produzcan reflexiones hacia la audiencia. La pared delantera llevará una estructura con los huecos exactos de los

altavoces que se van a montar, hay que controlar que éstos no transmitan vibraciones a la estructura. En cuanto al techo, se instalarán paneles con grandes cámaras de aire y materiales más gruesos que en las paredes (6") lo cual permite controlar la absorción en baja frecuencia.

### 2.3.4. Sistema de refuerzo sonoro

Todas las salas deben soportar al menos un tipo de audio digital con una configuración 5.1 (o 7.1 según la norma de cine digital DCI) que puede reproducir en estéreo si fuera necesario. Dispondrá de tres canales de pantalla (L, C y R), dos canales surround (LS y RS) (o cuatro canales de surround LS, RS, BLS, BRS, según la norma de cine digital DCI) y una canal de efectos de baja frecuencia (LFE).

Los altavoces de pantalla irán incrustados en la pared tras la pantalla y rodeados de material absorbente. Estarán colocados verticalmente entre  $\frac{2}{3}$  y  $\frac{5}{8}$  de la altura de la pantalla apuntando al punto dulce (*"sweet point"*) que corresponde al la distancia  $\frac{2}{3}$  de la sala y en el centro. En cuanto a su posición horizontal deben colocarse para un formato 2,35:1 en los extremos de la pantalla (cubiertos por ella). En el caso de pantallas 1,85:1, los altavoces se ocultarán con una máscara de tela negra acústicamente transparente. Las guías incluyen la posibilidad de incluir 5 altavoces en el canal de pantalla colocados correctamente para cada formato. Deben proporcionar un nivel de presión sonora por canal de 85 dBC medido con ruido rosa. El canal LFE tiene que ir colocado en el suelo en la pared de la pantalla teniendo especial cuidado con las transmisiones estructurales. Debe proporcionar mayor nivel que los canales de pantalla y constará de uno o varios altavoces dependiendo del volumen de la sala (un altavoz cada 707m<sup>3</sup>).

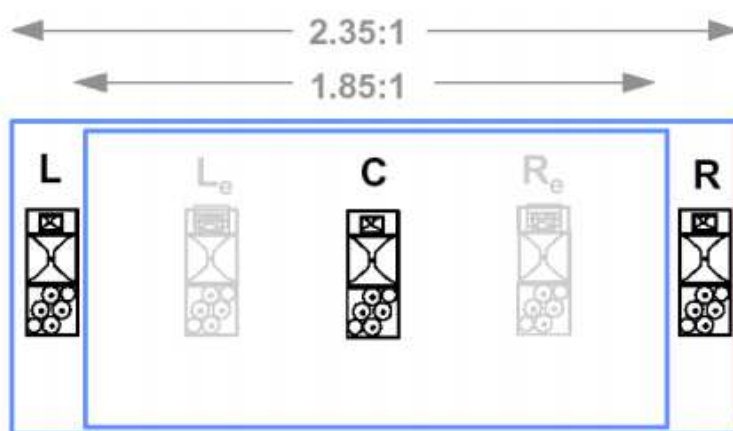


Figura 14. Posición de los altavoces de pantalla



El sistema de audio envolvente (*surround*) se colocará en las paredes laterales (evitando el primer tercio) y la pared trasera. La posición de los altavoces dependerá de las dimensiones de la sala; la altura debe ser entre 9 ft y 15 ft (2,7 m y 4,6 m), la separación horizontal entre 9 ft y 12 ft (2,7 m y 3,7 m) y la inclinación 15°. Debe conseguir un nivel de presión sonora total de 82 dBC por canal (izquierdo y derecho). El conjunto de altavoces de *surround* deben tener una cobertura de la zona de audiencia uniforme con un margen de  $\pm 2$  dB y los canales de pantalla, de manera independiente, de  $\pm 4$  dB.

Todos los amplificadores y altavoces deben aguantar variaciones de 20dB sin que se produzcan recortes, distorsión o sobrecarga. Además se deben ajustar los niveles a la curva de ecualización X de la ANSI/SMPTE 202M (ISO 2696) que se muestra en la Figura 15.

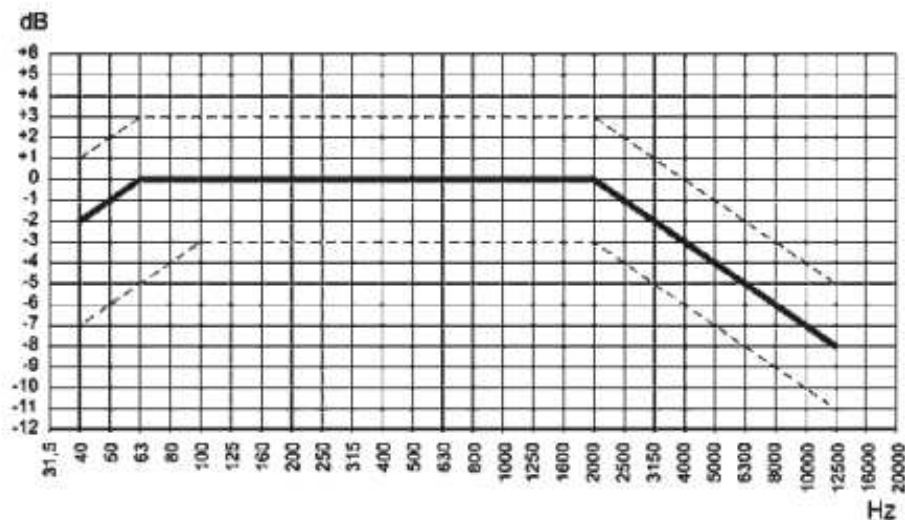


Figura 15. Curva X de ecualización



# **3**

## **Estado de la cuestión**



Este trabajo fin de master se engloba en el ámbito de la acústica de salas, en concreto en la realización de medidas de los parámetros acústicos que establece la norma UNE- EN ISO 3382-2 [1]. A lo largo de los últimos años se han realizado multitud de medidas siguiendo las recomendaciones de esta norma pero no todas las medidas se han realizado correctamente ya que los parámetros mínimos establecidos no siempre son los adecuados para el recinto en particular. Por ellos, los investigadores han estudiado la directividad de la fuente, el número de posiciones del micrófono, el tipo de señal de excitación, etcétera, para que los resultados de sus mediciones sean lo más fiables posibles.

Según la norma, se establece un mínimo de tres posiciones de fuente y entre seis y diez posiciones de micrófono dependiendo del número de butacas de la sala. Estas posiciones deben caracterizar la sala correctamente. En algunos estudios realizados, como Hidaka [10], se comprueba que el número de posiciones de micrófono debería ser mayor al indicado en la norma. En esta misma investigación se establece un rango de valores para la relación entre el número de asientos de la sala y el número de posiciones de micrófono ( $N/N_r$ ) que permiten realizar mediciones más precisas (ver Tabla. IV). Estos rangos dependerán de la variabilidad de los parámetros, siendo necesarias menor número de posiciones para el tiempo de reverberación que para la claridad ( $C80$ ). En el caso de las salas pequeñas (500 asientos), lo marcado en la norma cumple los criterios de Hitaka, pero para salas mayores no cumple la relación para la claridad. Resultados similares obtienen Montell et al. [11] utilizando, en este caso, el método de los variogramas para el cálculo del número mínimo de posiciones necesario dependiendo, de nuevo, de la variabilidad de los distintos parámetros.

Parámetros	$N/N_r$ [Hitaka]	Nr_1000 asientos [Hitaka]	Nr_1000asientos [ISO]
RT	300-400	3-4	8
EDT o IACC	150-250	4-7	8
$C80$ o G	< 100	> 10	8

Tabla. IV. Relación entre el número de asientos de la sala y el número de posiciones de micrófono para realizar una medición correcta

La separación mínima entre las posiciones marcadas es de 2 m, pero se ha demostrado con distintos estudios que en un mismo asiento pueden variar los resultados notablemente. A principio de los 90 ya se conocía que desplazamientos de

30 cm presentaban cambios importantes en algunos de los parámetros medidos, como expresan Bradley [12] o Pelorson [13], o se encuentran diferencias de más de 1.4 dB en el valor de C80 en un mismo asientos según Nielsen [14]. En la actualidad, Witew y Vorländer en [15] estudiaron la influencia de las posiciones elegidas en los parámetros y su incertidumbre midiendo alrededor de 100 posiciones colocadas en forma de rejilla en cuatro salas de congresos y auditorios. A partir de estas medidas y aplicando tanto la GUM como el método de Montecarlo, se determina una zona con un radio de 5 m donde la variación de C80 presenta una incertidumbre de  $\pm 1$  dB con una fiabilidad del 68% y  $\pm 2$  dB con una fiabilidad del 95% (incertidumbre expandida). Por otra parte, Arana [16] estudió la influencia de las posiciones del receptor teniendo en cuenta que éste no es una posición puntual sino que ocupa un espacio (debido a la separación de los oídos) incluyendo una posición central y 24 posiciones en circunferencias de 15 cm y 25 cm comprobando con ello la variabilidad espacial.

Otro tema ampliamente tratado es el problema de la directividad de las fuentes omnidireccionales. Aunque la norma permita que la fuente utilizada presente una desviación máxima entre 1 dB y 6 dB para frecuencias bajas y altas respectivamente, hay que tener especial cuidado con la orientación de la misma ya que en frecuencias altas presentan lóbulos. Si la directividad está muy cercana a los límites marcados, se recomienda realizar las mediciones en tres orientaciones y promediarlas. Behler [17] realizó un pequeño estudio para demostrar que el cambio de orientación de la fuente (rotaciones de  $20^\circ$ ) provoca modificaciones en los parámetros medidos. Para las bandas donde la fuente es omnidireccional (baja frecuencia) obtuvo desviaciones menores de 5% en todos los parámetros, pero en las bandas donde la fuente no es omnidireccional las variaciones eran mayores incluso para aquellos parámetros que se ven menos afectados por posición u orientación como el tiempo de reverberación. En San Martín y Arana [18] se confirman los resultados obtenidos por Behler. Gracias al programa de simulación Odeón se comparan el valor de C80 en el área de audiencia utilizando cuatro fuentes omnidireccionales con varias orientaciones. Se observa como en las bandas superiores a 1 kHz más del 15% de la zona de audiencia presenta diferencias perceptibles (hasta el 80% en las frecuencias más altas).

Para excitar la sala y obtener su respuesta se permite el uso de una señal impulsiva (pistolas, barridos sinusoidales, señales MLS, etc.) o de ruido aleatorio, pero no con todas las señales se obtienen los mismos resultados como ya estudió Halmrast en 1998. En [19], comparó los valores de distintos parámetros excitando una sala con cuatro tipos de señales (señal MLS, barrido sinusoidal, pistola e impulso eléctrico) y

obtuvo resultados similares para el tiempo de reverberación en todos los casos pero grandes variaciones en baja frecuencia para el tiempo central y la claridad. Diez años después [20] propuso la utilización de métodos más sencillos para la medida de parámetros mediante la grabación de la respuesta de la sala al impulso generado por un globo o una palmada en un archivo de audio. Ambas excitaciones presentaban algunos problemas en baja frecuencia, especialmente en salas grandes, pero los resultados eran razonablemente parecidos a mediciones realizadas según la ISO 3382. Jambrosic, Horvat, y Domitrovic [21][22] han realizado estudios similares en la Universidad de Zagreb en un aula pequeña, un pasillo irregular y una sala grande utilizando una fuente omnidireccional, una fuente directiva, globos y pistolas de distinto calibre. En las salas pequeñas el tiempo de reverberación medido no presentaba grandes diferencias pero en el resto de salas la excitación en baja frecuencia no era buena y el margen dinámico no llegaba a los niveles necesarios para realizar medidas fiables. Atendiendo al criterio de mejor margen dinámico obtenido recomendaban la utilización de barridos sinusoidales como método de excitación. En 2010, Passero y Zannin [23] realizaron la comparación de los valores del tiempo de reverberación (en la banda de 500 Hz, el promedio de las bandas de 500 Hz a 2 kHz y el promedio de 125 Hz a 4 kHz) calculados mediante los métodos tradicionales de medición (respuesta al impulso integrada y ruido interrumpido), la simulación del recinto por ordenador y las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades [24]. Los métodos de medición y simulación sólo presentaban diferencias significativas entre ellos cuando comparaban el promedio de las bandas de 500 Hz a 2 kHz del ruido interrumpido y la simulación. Además la fórmula que mejor se ajusta a estos resultados es Eyring. Este estudio arroja la posibilidad de usar los dos métodos descritos en la norma con resultados similares así como la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante simulación.

De los parámetros acústicos que indica la norma que se deben medir el más estudiado es el tiempo de reverberación; tanto estudios más teóricos ([23] o [25]) como estudios de los métodos de medición ([21], [23], [26] o [27]). De este parámetro existen valores de referencia según el uso y el tamaño de la sala, según se observa en la Figura 16 [28], pero dos recintos con igual tiempo de reverberación pueden resultar perceptivamente muy diferentes. Además es el parámetro con menor variabilidad espacial, como se ha comentado anteriormente y de nuevo se demuestra en Arregui et al. [26], en el que se realiza un estudio de las 375 butacas de un auditorio, obteniendo que no hay diferencias entre butacas si se tiene en cuenta el tiempo de reverberación medio y sólo presenta diferencias perceptibles entre ellas en la banda de 125 Hz. Por tanto, la obtención de un valor global del tiempo de reverberación da resultados

correctos; pero para otros parámetros no ocurre lo mismo. Por ejemplo, la variación de la fuerza sonora (G) será de al menos 1dB cada 10 metros de separación entre fuente-receptor [29].

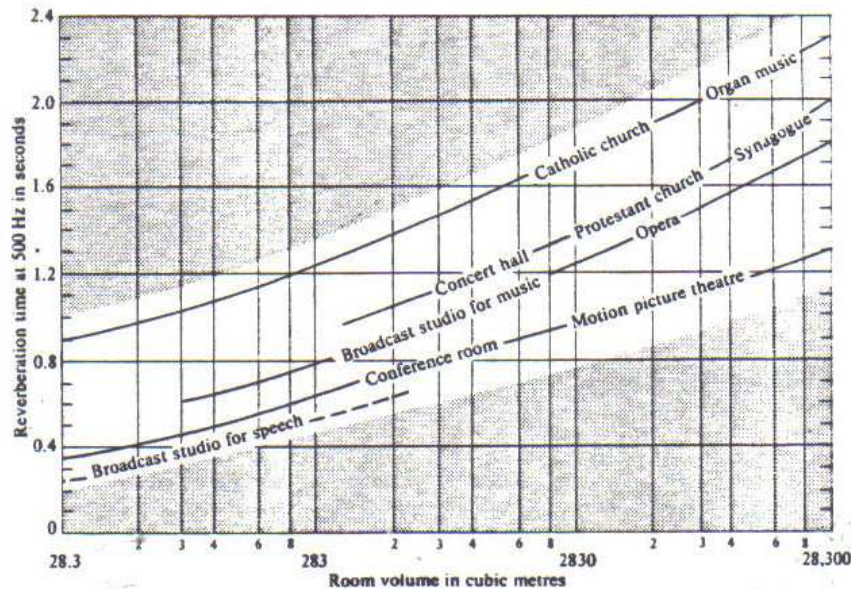


Figura 16. Valores del tiempo de reverberación recomendados según el uso y tamaño de la sala según Beranek [28]

Skålevik estudia ampliamente estos parámetros en distintos tipos de salas e indica que no es fructífero usar los valores recomendados para grandes salas de concierto como ideales para salas de música [30] o que es importante la influencia de los modos propios en salas pequeñas [31]. Además, en [32], demuestra que cuatro de los parámetros (G, EDT, C80 y Glate) se pueden calcular a partir del volumen, del tiempo de reverberación y de la distancia entre fuente y receptor, obteniendo resultados similares a los medidos con diferencias inferiores al 25% (medido en JND).

Por otro lado, el uso del valor de la relación impulso-ruido (INR) como parámetro de calidad es válido para obtener parámetros como el tiempo de reverberación, pero es importante estudiar el tiempo límite de integración en la claridad o el tiempo central. Las fórmulas de éstos consideran un tiempo infinito de integración y un recinto sin ruido de fondo, circunstancias que no se producen en la vida real. Hak y Verdegai, en [33], indica que para el cálculo de los coeficientes de correlación cruzada interaurales (IACC) la norma sugiere usar el valor del tiempo de reverberación como límite de integración, aunque sólo es válido para INR grandes que no necesitan compensación de ruido. Sugiere usar como tiempo infinitesimal el punto de cruce entre la recta de caída y el nivel del ruido de fondo en los parámetros en de relación de



energías. Los errores obtenidos fueron menores de 0,05 dB (0,01 dB) para C80 y 2 ms (0,5 ms) para Ts si el valor de INR era mayor de 35 dB (45 dB) y el tiempo de reverberación mayor de 0,5 s.

Habitualmente se usaba WinMLS [34] o Dirac [35] para la medición y el cálculo de los parámetros acústicos, pero este tipo de software es un poco complejo para investigadores fuera del campo de la acústica que requieran unos resultados rápidos. Por ello diferentes grupos de investigación están desarrollando software propios para realizar estas medidas. El Laboratorio de Acústica de la Universidad Pública de Navarra ha desarrollado Areto 1.0 [36] en el que pretenden buscar un equilibrio entre operatividad y eficacia basándose en la respuesta al impulso. Posee un módulo de grabación-reproducción y un módulo para la obtención de parámetros acústicos. Tras realizar pruebas de repetibilidad y reproducibilidad comparándolo con WinMLS y Odeon, se han obtenido resultados satisfactorios ya que funciona de manera estable. Por otro lado, la Universidad de Málaga junto a la empresa Genuix también ha desarrollado su propio software acústico [37] que permite la valoración de una sala de un modo más automatizado. Al iniciar la sesión de medición, se indica la información espacial de la sala (zonas de audiencia, dimensiones...), el número de posiciones, donde se encuentran y el orden de medida de los puntos y que datos se quieren obtener al finalizar la sesión (gráficas, datos estadísticos, etc.) Una vez configurado el programa se realizan las mediciones en ese orden para obtener los resultados automáticamente.

En los trabajos anteriormente mencionados se han estudiado teatros, auditorios, salas de conferencias o aulas ([23], [26], [30] o [31]), y en los últimos años se han comenzado estudios de iglesias y catedrales ([38] o [39]), pero no se han encontrado investigaciones efectuadas en salas cinematográficas. Estos recintos tienen unas características especiales ya que se da importancia tanto a la palabra como a los efectos o la música. A priori puede parecer que las características geométricas son similares a las de algunos auditorios pero las exigencias acústicas son muy diferentes. El sonido no va a provenir únicamente de la pantalla sino de todas las direcciones según sea la proyección y la sensación que el cineasta desee transmitir, por ello se usa siempre el sistema de refuerzo sonoro. De todos modos se va a tratar de manera similar a éstos a la hora de realizar las mediciones con fuente omnidireccional ya que se colocará la fuente sonora en la zona delantera de la sala, de donde provendrán las voces de los actores aunque la música o ambiente sean envolventes.

Hecho	Medición	Simulación
Geometría del recinto	Totalmente incluida por definición	Aproximada
Modificación de la geometría del recinto	Difícil	Fácil
Fenómeno ondulatorio (información de fase, difracción)	Totalmente incluido – inherente en campo sonoro real	Aproximado con precisión variable
Propiedades de las superficies	Totalmente incluido – inherente en el recinto real	Los coeficientes de absorción y dispersión deben medirse o asumirse, con precisión limitada
Absorción del aire (en función de la temperatura y humedad)	Totalmente incluida pero puede variar significativamente en diferentes mediciones	Calculada a partir de fórmulas teóricas, pero muy precisa
Directividad de la fuente	Imperfecta: lóbulos en altas frecuencias	Perfectamente omnidireccional
Rango dinámico de la fuente	Insuficiente en frecuencia muy bajas y muy altas. Distorsión a niveles altos	Rango dinámico ilimitado a todas las frecuencias. No hay distorsión.
Calibración de la fuente	Necesidad de un procedimiento especial para el parámetro G	Perfecto por definición
Ruido de fondo	Está presente y limita el rango dinámico	No está presente.
Directividad del micrófono	Micrófono omnidireccional. Algunos parámetros necesitan patrón en 8 o una cabeza artificial	Disponibles todas las directividades
Resultados en diferentes bandas de octava	Filtrado necesario, lo cual altera la señal original	Resultados son derivados directamente en las diferentes bandas – no hay alteración debido al filtrado
Reproducibilidad	Imperfecta: depende fuertemente de la fuente	Puede ser perfecta, dependiendo del algoritmo
Influencia del operador	Conocimiento y experiencia importante	Conocimiento y experiencia muy importante

Tabla. V. Hechos asociados a mediciones y simulaciones. Tabla traducida de “The ISO 3382 parameters: Can we simulate them? Can we measure them?” [41]

Los resultados obtenidos mediante mediciones son fiables si se siguen las recomendaciones de la norma, así como las de investigaciones anteriores, pero ¿qué ocurre en el caso de las simulaciones?. Según Vorländer en [40] la fiabilidad de los resultados obtenidos en una simulación dependerá de la calidad del algoritmo de cálculo, los datos de entrada (geometría del recinto, condiciones de los bordes, etc.) y del operador. Algunos programas no permiten la inclusión de los coeficientes de absorción según los ángulos de incidencia o las dispersiones y/o se generarán errores sistemáticos y no predecibles por culpa de la difracción o los modos propios. Para comprobar la fiabilidad del modelo se recomienda comparar los resultados de la simulación con medidas o resultados analíticos y obtener diferencias menores de la diferencia mínima perceptible (JND). Christensen [41] añade algunos problemas a las simulaciones; indica que no se incluye la información de fase y por tanto los resultados son válidos por encima de la frecuencia límite de Schroeder; que la fuente es perfecta omnidireccional; o que no se tiene en cuenta el ruido de fondo, por lo que siempre hay un rango dinámico "infinito". La Tabla. V reúne todos los aspectos referentes a las diferencias entre mediciones y simulaciones. Comparando las mediciones y simulación en dos recintos (un auditorio y la catedral de Santa Sofía) obtiene que las incertidumbres mayores vendrán dadas por las simplificaciones del recinto y los coeficientes de absorción y dispersión y que se consiguen resultados parecidos siempre que se tenga cuidado en la implementación y uso de los algoritmos.

A la hora de elegir los algoritmos de cálculo se debe tener en cuenta las distintas características del recinto. Se trabaja con métodos basados en la resolución de la ecuación de ondas (Métodos de Elementos Finitos - FEM y Métodos de Elementos de Contorno-BEM) y los basados en movimientos de partículas en un rayo (Trazado de Rayos, Fuentes Imagen e Híbrido). Con los primeros de ellos se obtienen resultados precisos en frecuencias puntuales y son recomendables para recintos pequeños y estudios de baja frecuencia. Los segundos son los que habitualmente se utilizan para el estudio de recintos grandes y complicados ya que dan resultados en frecuencias altas. Rindel ha estudiado los distintos métodos [42] y los ha comparado con el uso de modelos a escala. En el método de trazado de rayos tiene en cuenta la absorción de las superficies y es importante establecer un número mínimo de rayos para que los resultados sean fiables ya que se establece un área o volumen de recepción y sólo se tienen en cuenta los rayos que pasan por el. Si se trabaja con fuentes imagen los resultados serán más precisos, pero necesitará más tiempo de procesado ya que se calculan un gran número de fuentes imagen que no siempre contribuyen en un receptor determinado. El método híbrido resulta de combinar los dos

métodos anteriores mediante una manera más eficiente en el cálculo de fuentes imagen estudiando su visibilidad en un receptor determinado a partir del camino recorrido. Da especial importancia a los coeficientes de dispersión estableciendo como valores aproximados 0.1 en superficies grandes y planas y 0.7 para superficies muy irregulares; recomienda medirlos según la norma ISO/CD 17497 [43]. En su comparación con los modelos a escala, en este [42] y otros trabajos [44], indica que los modelos por ordenador son más flexibles (más fácilmente modificables), más rápidos, requieren de menor tiempo y coste, y se obtienen resultados con mejor visualización y mayor posibilidad de análisis debido a la cantidad de información de la que disponen, pero no consigue la fiabilidad necesaria con los efectos de la reflexión, la difracción y la dispersión. Vorländer, en [45], también analiza los distintos métodos de simulación, ya que en la actualidad se han ampliado los campos de uso a automóviles o máquinas, llegando a conclusiones similares a las de Rindel. Los problemas a la hora de simular un recinto están en la correcta inclusión de los datos de entrada (absorción y dispersión), así como los errores sistemáticos y estocásticos debidos al algoritmo y la elección del máximo orden de reflexión, número de rayos, etc. Todas estas características serán las fuentes principales de incertidumbre. Además indica que para recintos pequeños se deben utilizar el Método de Elementos Finitos unido a los Métodos Geométricos.

En cuanto al software de simulación de recintos existen varias opciones en el mercado cada una de ellas basada en el uso de unos métodos otros. Por ejemplo, LMS SYSNOISE [46] está basado en resolución de la ecuación de ondas (BEM y FEM) y trabaja con la vibración de estructuras, el campo sonoro alrededor de dicha estructura o en el interior de una cavidad ya sea un pequeño recinto, un automóvil, una pieza de maquinarias, etc. En cambio, ODEON [47] o EASE [4] (que será el usado en este Trabajo Fin de Máster) están basados principalmente en métodos geométricos. En [45] Vorländer indica algunos factores a tener en cuenta a la hora de diseñar el recinto en este tipo de software. El nivel de detalle a la hora de incluir las superficies será tal que el tamaño de los polígonos sean comparable a longitud de onda ya que si el detalle es mucho mayor el tiempo de procesado se incrementa notablemente. Los programas de simulación no permiten la inclusión de curvas, éstas estarán formadas por un número finito de planos lo que dará mayor o menor precisión al modelo. Hay que tener especial cuidado al fijar los datos de entrada (coeficientes de absorción y dispersión) y los obstáculos que se presenten en medio del recinto (reflectores o columnas) ya que pueden provocar problemas y/o mucho tiempo de procesado debido a la difracción en los bordes. Además señala que los manuales no suelen ser

suficientes para el uso porque cada programa trata de diferente manera reflexión difusa y especular, las reflexiones tardías o tempranas... y el número mínimo de rayos o resolución no se especifica en muchas ocasiones.

Tras el diseño del modelo, la inclusión de los datos geométricos y acústicos conocidos, se pasa al proceso de validación del mismo. En [48], San Martín et al. explican este proceso. Es necesario ajustar los coeficientes de absorción de los materiales de la sala de manera que la diferencia entre el tiempo de reverberación medido y simulado no sea mayor de la diferencia apenas perceptible (*Just Noticeable Difference*) indicada en la norma. Aunque existen investigadores que recomiendan no ajustar los datos de entrada [45]. Se podría realizar la validación con otros parámetros, pero lo habitual es usar el tiempo de reverberación que es el que menor variabilidad presenta. Tras dicho ajuste del recinto, se podrán comparar los datos simulados con los medidos, así como realizar variaciones en el recinto y predecir sus características acústicas. San Martín et al. recuerdan que no sólo hay que tener en cuenta los parámetros acústicos a la hora de validar el modelo sino también la directividad, algoritmos de procesado..., es decir, todos los puntos que pueden ser fuentes de error.

Como se ha comentado anteriormente, durante el proceso de comparación de resultados, se puede estudiar la variación espacial de los parámetros comparando las distintas posiciones, las diferencias entre bandas de frecuencia, los distintos métodos, etcétera. Para todas estas comparaciones se utilizan medidas de dispersión (rangos, varianzas, desviaciones...) y diferencias o errores relativos medidos en jnd; así como los promedios de los parámetros y su correlación.



# **4 Descripción del recinto**





Los cines Kinépolis Madrid se encuentran situados en el complejo de “Ciudad de la Imagen” en Pozuelo de Alarcón (Calle Edgar Neville s/n 28223 Madrid) y abrieron sus puertas en 1998. Cuentan con un total de 25 salas de distintos tamaños (ver Tabla. VI) siendo una de ellas la sala más grande del mundo con casi 1000 butacas.



Figura 17. Mapa de la situación de los cines Kinépolis [49]

Número de sala	Número de Butacas	Distancia pantalla -proyector	Tamaño de la pantalla
1, 2, 11-14, 23 y 24	211 - 214	24,40 m	6,00 m x 14,00 m
3, 4, 9, 10, 15, 16, 21 y 22	327-330	30,20 m	7,00 m x 17,00 m
5, 8, 17- 20	408 - 413	35,30 m	8,00 m x 20,00 m
6 y 7	704 - 706	40,50 m	10,00 m x 25,00 m
25	996	47,50 m	12,00 m x 26,50 m

Tabla. VI. Resumen de las salas del complejo según su tamaño y capacidad

La sala de estudio es la sala 6 que tiene una capacidad de 706 butacas y 15 sillas de ruedas repartidas en 22 filas con una pendiente entre 13° en la parte delantera y 16° en la trasera. Las dimensiones son 26,20 m de ancho, 40,50 m de largo y la altura está comprendida entre 3,60 m y 10,70 m como se observa en la Figura 18 y la Figura 19. El volumen de la sala es aproximadamente 8800m<sup>3</sup>.

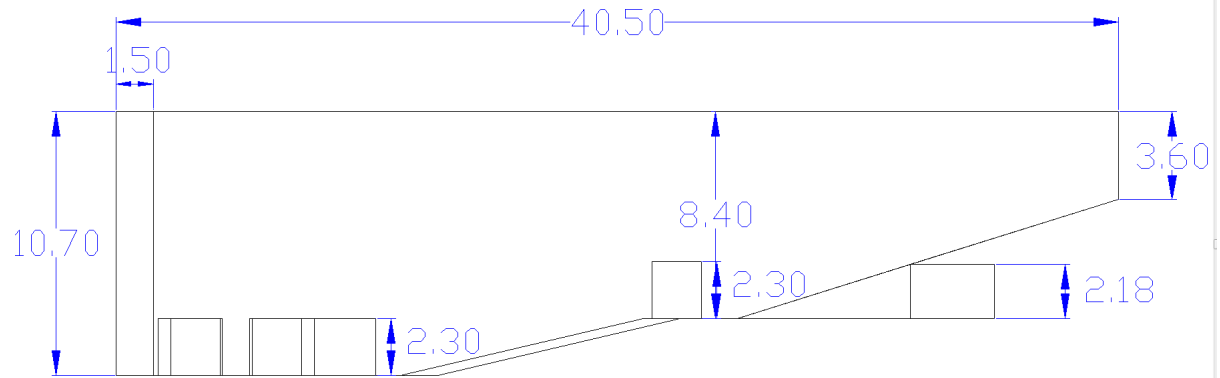


Figura 18. Alzado lateral de la sala diseñada con EASE. Dimensiones en metros.

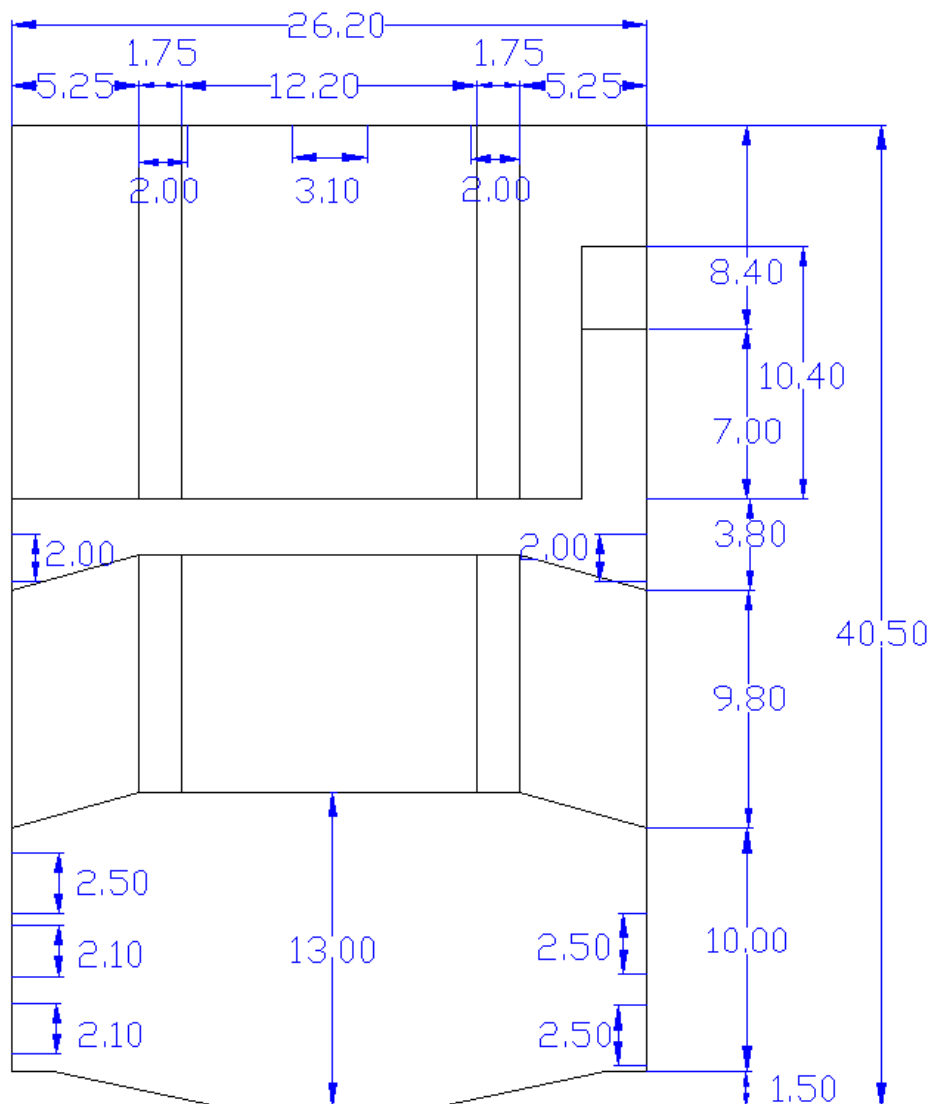


Figura 19. Planta de la sala 6 diseñada con EASE. Dimensiones en metros.

Cuenta con una puerta de entrada en un pasillo lateral y tres puertas de salida de emergencia en la zona delantera (marcados en la Figura 20 con la letra P), además de con seis rejillas de ventilación (marcados con la letra V) y una pequeña ventana de proyección en la parte trasera.

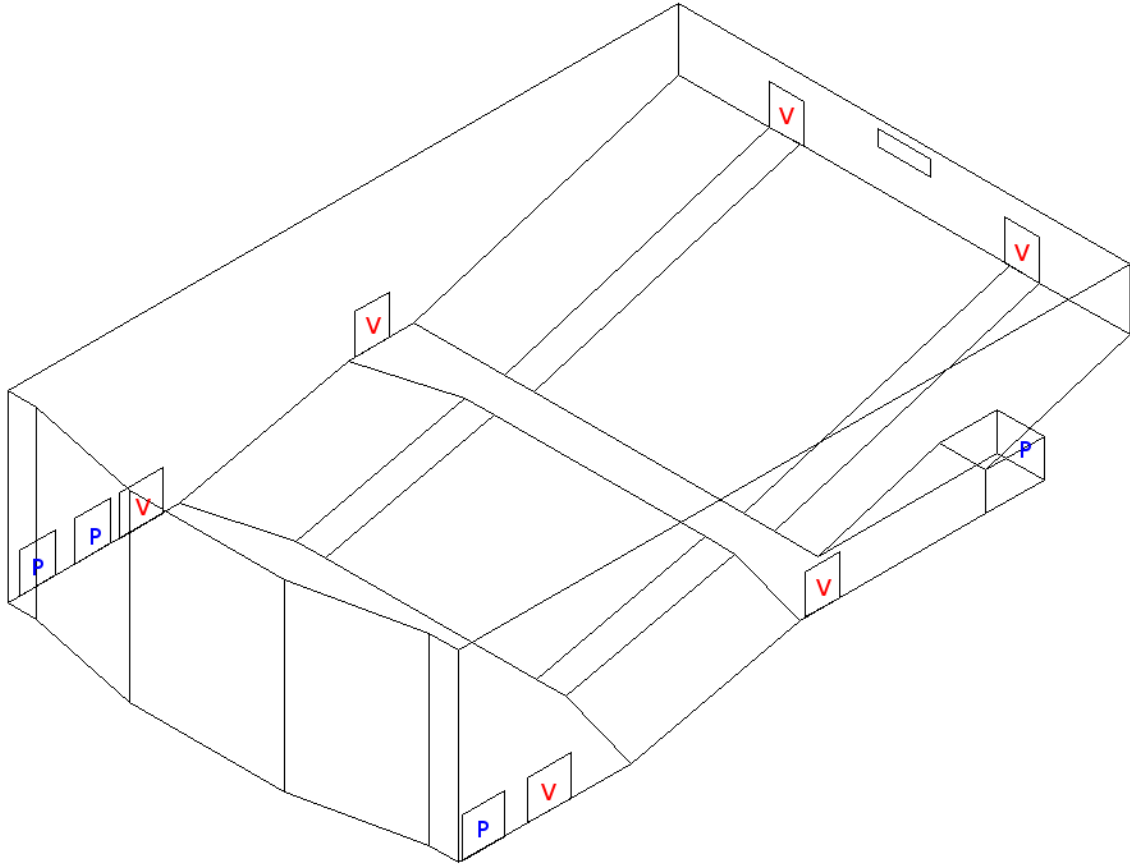


Figura 20. Recinto en 3 dimensiones diseñado con EASE (P=puertas de entrada/salida, V=rejilla de ventilación)

En la Figura 21 y la Figura 22 se incluyen algunas fotografías de la sala, en las que se pueden observar el tamaño, el tipo de butacas o algunos detalles como la ventana de proyección o las rejillas de ventilación. En la pared delantera de la sala se encuentra una pantalla curva de 10 m de alto por 25 m de ancho que está colocada pegada al techo y centrada horizontalmente.





Figura 21. Fotografías de la sala 6



Figura 22. Rejilla de ventilación (superior-izquierda), butaca (superior-derecha) y puertas de salida laterales de la parte delantera (inferior)

Las superficies de la sala están cubiertas por distintos materiales, los cuales se describen en la Tabla. VII. En la Figura 23 se completan estas características mostrando los coeficientes de absorción gráficamente. Los materiales han sido seleccionados de proyectos anteriores [50][51] y del proceso de validación del modelo a partir de los materiales de la base de datos de EASE y otros materiales comerciales creados manualmente.

Material	Descripción	Superficie cubierta	Porcentaje sobre St [%]
Panel de Arbosilicato		Paredes laterales	19,94
Isomalla de Notson	Paneles de fibra de vidrio, $d=22 \text{ Kg/m}^3$ , espesor 100 mm.	Pared trasera	32,31
Lana mineral 15	Lana mineral con grosor de 15 mm	Pared delantera	8,90
Moqueta	Moqueta sobre 3mm de fieltro.	Suelo	15,05
Rejilla de madera	Rejilla de madera 120/15mm con 40cm de fibra de vidrio	Techo	33,06
Vidrio	Ventana normal de vidrio	Ventana de proyección	0,09
Butaca tapizada	Butaca tapizada de terciopelo	Butacas	18,78
Rejilla	Rejilla de ventilación	Ventilación	0,93
Puerta sólida de madera	Puerta sólidas de madera	Puertas	0,67

Tabla. VII. Materiales de la sala de estudio

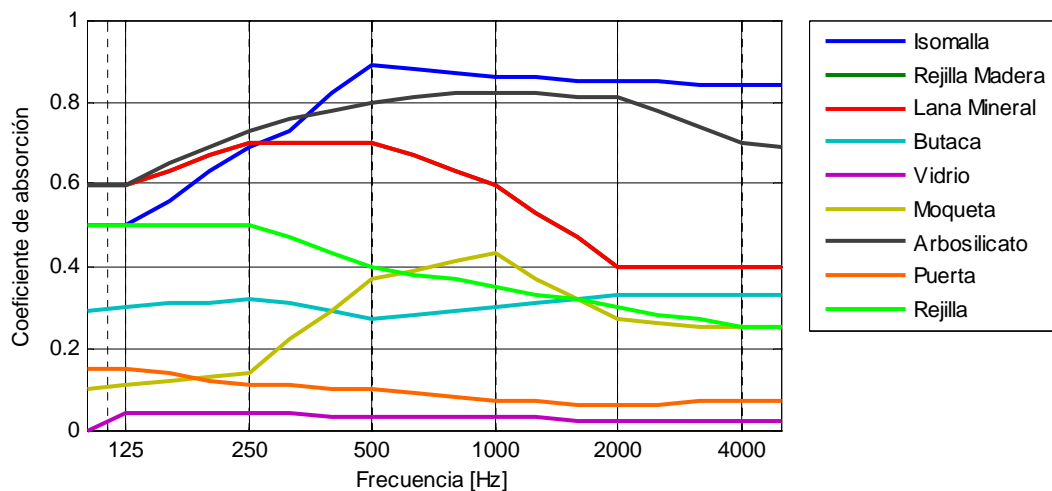


Figura 23. Coeficientes de absorción de los materiales de la sala

La sala tiene instalado un sistema de refuerzo sonoro que consta de 24 altavoces de surround repartidos en las dos paredes laterales y la pared trasera (8 en cada una de ellas), un sistema de pantalla con tres canales y un canal de baja frecuencia. En la Tabla. VIII, se detallan las características de estos altavoces.

Canal	Nº Altavoces	Marca	Modelo
Derecho	1	JBL	5674
Izquierdo	1	JBL	5674
Central	1	JBL	5674
LFE	1	JBL	4624
Surround Izquierdo	12	JBL	8350
Surround Derecho	12	JBL	8350

Tabla. VIII. Características de los altavoces de la sala

# **5**

## **Métodos de medida, simulación y análisis**





## 5.1. Medición in situ

Se han realizado dos mediciones in situ. La primera de ellas con una fuente omnidireccional que permite seguir los pasos que marcan la norma UNE-EN ISO 3382-1 y la segunda con el sistema de refuerzo sonoro de la sala se explican de manera conjunta ambos procesos.

### 5.1.1. Instrumentación

Se ha utilizado la instrumentación que se detalla en el siguiente listado:

- Una fuente de ruido omnidireccional DO-12 de Álava Ingenieros y su trípode con ruedas (para la medición según norma).
- Un amplificador de potencia modelo Luter M-700 (para la medición según norma).
- Sistema de altavoces de la sala (para medición con sistema de refuerzo sonoro).
- Un interfaz de audio USB modelo ZE-0948 de Brüel & Kjær.
- Un portátil Toshiba con sistema operativo Windows 7 y el software DIRAC 5.0.
- Un preamplificador de micrófono.
- Una pareja de micrófonos AKG CK 92 y AKG CK 94 con previo SE 300B y un pie de micrófono.
- Un sonómetro de Brüel & Kjær modelo 2260.
- Una cinta métrica y un medidor láser Leica.
- Una sonda de temperatura y humedad.
- Cableado: Bobinas XLR-XLR, cables *Speakon-Speakon* y alargadores de red.

## 5.1.2. Procedimiento de medida

El procedimiento de medida y análisis se va a plantear en cuatro pasos para que la explicación sea más clara y ordenada.

### 5.1.2.1. Dimensiones y selección de puntos

El primer paso realizado fue la determinación de las dimensiones de la sala, las cuales se presentan en el apartado 4, así como el análisis de las características de las mismas (estado de ocupación, cortinas, sistemas de ventilación...) para elegir tanto las posiciones de fuente omnidireccional y micrófono como la posición del equipo de medición. La sala presentaba un estado de inocupación, en el que únicamente los dos técnicos se encontraban en el interior de la sala. No estaba encendido ni el sistema de sonorización ni los sistemas de ventilación. A su vez se procedió a la medición de la temperatura y la humedad relativa del recinto.

A la hora de seleccionar las posiciones de fuente y micrófono se han tenido en cuenta los siguientes aspectos que marca la normativa:

- El número de posiciones de micrófono está entre seis y diez dependiendo del tamaño de la sala y siempre de manera que la caracterice correctamente.
- El número mínimo de posiciones de fuente es tres.
- La altura del centro acústico de la fuente recomendada es 1,5 m y la altura del micrófono 1,2 m.
- La separación mínima entre:
  - El micrófono y las superficies cercanas es de 1 m.
  - Las distintas posiciones de micrófono de 2 m.
  - El micrófono y la fuente es de 1,5 m.

Atendiendo a lo anteriormente comentado, se han seleccionado tres posiciones de fuente en la parte delantera de la sala (F1, F2 y F3) y nueve posiciones de micrófono repartidas por el patio de butacas (M1, M2, M3, etc.) que se muestran gráficamente en la Figura 24. Se ha seleccionado un número mayor de posiciones de micrófono del indicado en la norma ya que se desea obtener unos resultados fiables y

muchos de los parámetros dependerán ampliamente de la posición siendo la sala demasiado grande para coger tan sólo siete puntos.

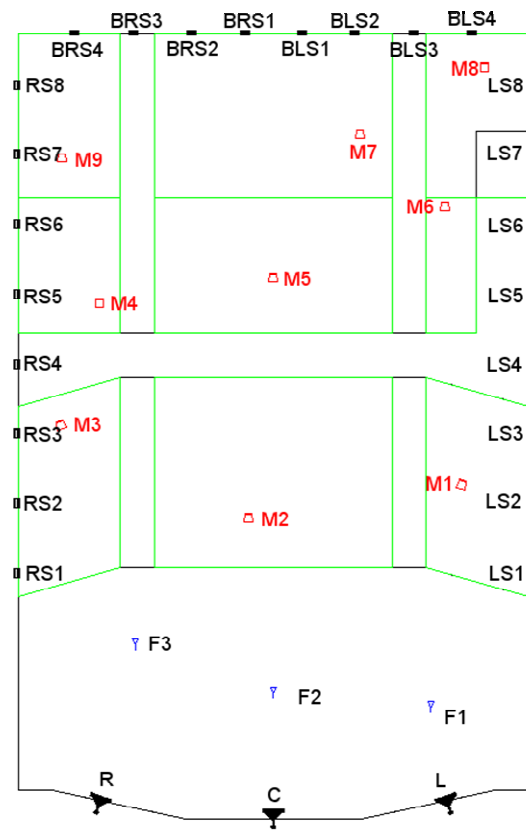


Figura 24. Plano de la sala: posiciones de las fuentes y micrófono

Se han cumplido las especificaciones de separación mínima de las superficies tanto para las posiciones de micrófono como para las posiciones de fuente, así como las alturas recomendadas de 1,5 m y 1,2 m. En la Tabla. IX y la Tabla. X se muestran las distancias a las superficies así como las coordenadas tomando como referencia el centro de la pared donde está situada la pantalla.

Posiciones de fuente	Distancia a la pantalla [m]	Distancia a la pared más cercana [m]	Coordenada x	Coordenada y
1	3,0	5,0	8,10	5,78
2	6,5	13,0	0,00	6,50
3	8,4	6,0	-7,10	9,00

Tabla. IX. Posiciones de la fuente omnidireccional en la sala, distancias a las superficies cercanas y coordenadas respecto al centro de la pantalla

Posición de micrófono	Fila	Número de Butaca	Distancia a la pared cercana [m]	Coordenada x	Coordenada y
1	5	30	3,38	9,72	17,37
2	3	16	11,82	-1,28	15,63
3	8	4	2,15	-10,95	20,42
4	11	7	4,16	-8,94	26,67
5	12	18	10,40	0,00	27,95
6	15	29	1,60	8,80	31,70
7	18	25	8,62	4,48	35,45
8	21	32	1,60	10,86	38,90
9	17	4	2,24	-10,86	34,20

Tabla. X. Posiciones del micrófono en la sala en numeración de la sala y en coordenadas respecto al centro de la pantalla

Para las medidas con el sistema de refuerzo sonoro, las posiciones de micrófono elegidas son las mismas que para el caso anterior, pero las fuentes en este caso se encuentran en las distintas paredes del recinto. Se utilizará cada uno de los canales del sistema 5.1 como una posición de fuente. Por lo tanto, habrá un total de 5 “posiciones” de fuente independientes. En la Tabla. XII y la Tabla. XII se indican las posiciones de cada uno de los altavoces (altura y coordenadas) y en la Figura 24 se muestran estas posiciones sobre el plano de la sala.

Posición de fuente	Distancia al suelo [m]	Coordenada x	Coordenada y	Coordenada z
C	6,95	0,00	0,00	6,95
L	6,95	9,00	0,70	6,95
R	6,95	- 9,00	0,70	6,95

Tabla. XI. Posiciones de los altavoces de pantalla: altura y coordenadas respecto al centro de la pantalla

Posición de fuente	Distancia al suelo [m]	Coordenada x	Coordenada y	Coordenada z
LS1 - RS1	4,40	$\pm 13,10$	12,70	4,90
LS2 - RS2	4,80	$\pm 13,10$	16,30	5,80
LS3 - RS3	4,60	$\pm 13,10$	19,90	6,50
LS4 - RS4	4,80	$\pm 13,10$	23,50	7,10
LS5 - RS5	4,40	$\pm 13,10$	27,10	7,40
LS6 - RS6	4,20	$\pm 13,10$	30,70	8,80
LS7 - RS7	4,00	$\pm 13,10$	34,30	9,40
LS8 - RS8	3,90	$\pm 13,10$	37,90	10,10
BLS1-BRS1	3,60	$\pm 1,45$	40,50	10,45
BLS2-BRS2	3,60	$\pm 4,20$	40,50	10,45
BLS3-BRS3	3,60	$\pm 7,20$	40,50	10,45
BLS4-BRS4	3,60	$\pm 10,20$	40,50	10,45

Tabla. XII. Posiciones de los altavoces de surround: altura y coordenadas respecto al centro de la pantalla

#### 5.1.2.2. Elección del método de medida

Se ha utilizado el método de respuesta impulsiva integrada con dos tipos de señales: secuencias de longitud máxima (MLS) y barrido sinusoidal exponencial. Para generar dichas señales se utilizó el generador interno de DIRAC. Se ajustaron los niveles de emisión y recepción de manera que el valor de la relación impulso-ruido sea mayor de 35 dB para medir T20 y mayor de 45 dB para medir T30. En las bandas bajas de frecuencia no se consiguieron estos niveles por lo que los resultados no son lo suficientemente fiables para algunas posiciones. No se intentó aumentar más el nivel de la fuente ya que se producía saturación en el interfaz de audio USB, lo cual no está permitido y la medida en ese punto sería descartada por completo y no únicamente alguna banda.

Se capturaron las respuestas al impulso de la sala con un micrófono omnidireccional y uno bidireccional simultáneamente para poder medir los siguientes parámetros:

- Reverberación: Tiempo de reverberación inicial (EDT), Tiempo de reverberación (T20 y T30).
- Claridad : Claridad (C80), Definición (D50) y Tiempo central (Ts)

- Ancho aparente de la fuente: Fracción de energía lateral (LF)

No se van a calcular los valores del parámetro de la fuerza sonora (G) porque no se dispone de la calibración de la fuente para obtener la respuesta medida en campo libre a 10 m de la fuente.

#### 5.1.2.3. Orden de medición

En el caso de medición según ISO 3382-1, para cada una de las nueve posiciones de micrófono se han realizado las mediciones de tres posiciones de fuente con dos tipos de señales. Se comenzó con la posición M1 de micrófono y moviendo la fuente a sus tres posiciones seleccionadas, para cada una de estas combinaciones se excitó la sala con ambas señales. Esto implica que para cada combinación micrófono-fuente la posición es exactamente la misma para las dos señales de excitación. A su vez la posición de micrófono es la misma, sin ninguna variación, para todas las posiciones de fuente. Para que una mayor claridad se detalla el orden para la primera posición de micrófono a continuación:

- 1) M1-F1 con señal MLS
- 2) M1-F1 con señal barrido
- 3) M1-F2 con señal MLS
- 4) M1-F2 con señal barrido
- 5) M1-F3 con señal MLS
- 6) M1-F3 con señal barrido

Tras cada una de estas medidas se comprobó que el valor de la relación impulso-ruido para dar por válida la medida y guardarla o repetirla según fuera necesario.

En el caso de la medición con el sistema de refuerzo sonoro de la sala, las posiciones de la fuente sonora corresponden a las posiciones de cada uno de los altavoces de la sala por lo que son fijas y se va moviendo el micrófono por cada uno de los puntos elegidos. Al igual que con fuente omnidireccional, se realiza primero la excitación con señal MLS y posteriormente con señal de barrido.

### **5.1.3. Procesado y análisis de datos**

A partir de las respuestas impulsivas guardadas, se ha procedido a obtener los parámetros acústicos con el software DIRAC. Se han tomado los valores de 100 Hz a

5000 Hz en octava y en tercio de octava y guardado en una hoja de cálculo Excel (.xls) para su posterior procesado.

Tras comprobar en las hojas de cálculo que la relación impulso-ruido no alcanza los valores mínimos requeridos para el cálculo del tiempo de reverberación (T20 y T30) en bandas de baja frecuencia, y teniendo esto en cuenta, se procede al procesado de datos en MatLab.

El primer paso ha sido importar todos los datos de los archivos Excel a variables de MatLab y ordenarlos para poder trabajar con ellos; ya que DIRAC proporciona los datos por combinación de micrófono-fuente y es más sencillo trabajar con ellos ordenados por parámetros.

Ya con los datos en MatLab se ha comenzado el procesado. Se han realizado promedios aritméticos de los parámetros medidos obteniendo el valor medio por banda de frecuencias para cada posición de micrófono, para cada posición de fuente y el promedio general de la sala. Además, se ha calculado la desviación estándar de todas las medias que se utilizará como medida de precisión. Estos datos proporcionarán la información acerca del comportamiento en frecuencia de la sala de una manera global y según la zona de la sala. En el caso del sistema de refuerzo sonoro, se han agrupado las fuentes de tres modos; se ha realizado un promedio con todas las fuentes, con el conjunto de altavoces de pantalla y con el conjunto de altavoces de surround.

Al representar gráficamente los datos de T20, T30 y EDT por posición de micrófono para comprobar si los cálculos realizados eran correctos, se ha notado que algunos de los resultados eran demasiado bajos. Por ello, se han analizado más detalladamente los valores de cada medida y se han encontrado algunos valores que se podrían considerar aberrantes. En la Tabla. XIII se muestra un ejemplo de la banda de 2500 Hz y la combinación F3-M8. Ambas señales cumplen los valores mínimos de INR, pero en el caso de la señal de MLS no calcula correctamente los parámetros de reverberación, pero si el resto. Para descartar estos valores se ha aplicado el Criterio de Rechazo de Chauvenet.

<b>F3 - M8 - 2500 Hz</b>	<b>MLS</b>	<b>Barrido</b>
EDT [s]	0,005	0,346
T20 [s]	0,002	0,739
T30 [s]	0,002	0,809
INR [dB]	54	56
LF [-]	0,63	0,65
Ts [ms]	21,5	21,4
C80 [dB]	16,02	15,93
D50 [-]	0,92	0,92

Tabla. XIII. Valores de los parámetros para la posición M8 y F3

El Criterio de Chauvenet se basa en el cálculo de la media y la desviación estándar de una muestra marcando un margen de confianza. De manera que, asumiendo una distribución normal, se rechazan aquellos valores cuya probabilidad de aparición sea inferior a  $1/2n$ , siendo  $n$  el número de medidas. Si la diferencia entre la media de todos los datos y un dato en concreto supera a la desviación estándar multiplicada por el coeficiente de Chauvenet (Tabla. XIV), ese dato es dudoso y se descarta.

$$\begin{aligned} |X_i - \bar{X}| > c * \sigma &\Rightarrow \text{se descarta el dato} \\ |X_i - \bar{X}| \leq c * \sigma &\Rightarrow \text{no se descarta el dato} \end{aligned} \quad (15)$$

<b>Número de muestras (n)</b>	<b>Coeficiente de Chauvenet (c)</b>
3	1,38
5	1,65
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57

Tabla. XIV. Coeficientes de Chauvenet

Tras un pequeño análisis de los valores de INR. Se ha evaluado el tiempo de reverberación medio de la sala para comprobar si existe una diferencia perceptible al incluir o no los valores “no fiables” tanto en las medidas realizadas con señal MLS como las de barrido. Estas diferencias se han contrastado tanto en octavas como en



tercios de octava en función del valor de la Diferencia Apenas Perceptible (JND- *Just Noticeable Difference*) que es del 5% para el tiempo de reverberación.

De manera independiente para las dos mediciones realizadas, se han comparado los datos promedios de la sala y los promedios por posición de micrófono de todos los parámetros según el tipo de señal utilizado en función del valor del valor de JND que marca la norma, tomando como referencia la señal de barrido. Estas diferencias son: un 5% para los parámetros de reverberación, 1 dB para la Claridad, 10 ms para el Tiempo Central y 0,05 para la Definición y Fracción de Energía Lateral. Con ellos se verán si existen diferencias entre utilizar uno u otro tipo de señal a la hora de calcular los parámetros acústicos, ya que en cuestión de INR si que existen diferencias.

Se han realizado las representaciones de los parámetros en función de la distancia entre la fuente y el receptor para comprobar si existe una tendencia clara al alejarnos o acercarnos a la fuente. Estas representaciones incluyen tanto los datos medidos para cada combinación como la recta de tendencia para una visión más directa.

Se ha obtenido el valor único de los parámetros promediando las bandas de frecuencia de octava de 500 Hz a 1 kHz para todos ellos menos LF cuyo promedio va desde 125 Hz a 1kHz. Así como los valores por zonas en baja, media y alta frecuencia como recomienda la norma para cada una de las posiciones, ya que los parámetros relativos a la percepción dependen de la posición del oyente.

Tras la obtención de los resultados individuales para cada tipo de medición se ha procedido a la comparación entre tipos de fuente tomando como referencia la medida con fuente omnidireccional y teniendo en cuenta los valores de JND para cada parámetro. Se han comparado las medias de la sala, los promedios zonales y los valores únicos para obtener las conclusiones de este trabajo.

Por último, se incluirán los datos de incertidumbre de los promedios de la sala y los valores globales a partir de los valores de desviación estándar (incertidumbre tipo A) y la resolución del equipo (incertidumbre tipo B). Para el tiempo de reverberación, la norma incluye unas fórmulas para el cálculo de la incertidumbre que se muestran en (16), donde B es el ancho de banda en Hz, N es el número de combinación de fuente y micrófono independientes y n es el número de decrecimientos.

$$\sigma(T_{20}) = 0,88T_{20} \sqrt{\frac{1 + \frac{1,9}{n}}{N \cdot B \cdot T_{20}}} \quad (16)$$

$$\sigma(T_{30}) = 0,55T_{30} \sqrt{\frac{1 + \frac{1,52}{n}}{N \cdot B \cdot T_{30}}}$$

## 5.2. Simulación con EASE 4.3

### 5.2.1. Creación del modelo

A partir de las dimensiones medidas en la sala, se procede a la creación de un modelo en EASE (ver Figura 25). El modelo consta de un total de 35 superficies repartidas según se muestra en la Tabla. XV. A estas superficies se les han asignado unos materiales “típicos” de salas de cine, que también pueden verse en la tabla, que se modificarán cuanto sea necesario durante el proceso de validación.

Superficie real (Material inicial)	Nº Superficies	Dimensiones [m2]
Butacas (Butaca terciopelo)	F16, F17, F18 F21, F23, F5	575,08
Pared lateral (Panel DIN - Lana de vidrio)	F9, F12, F13, F15	679,94
Pared pantalla (Lana Mineral 15mm)	F1, F2, F3, F7, F8	283,78
Pared trasera (Isomalla – Fibra de vidrio)	F6	94,32
Puerta delantera (Madera)	F26, F27, F30	15,41
Puerta entrada (Madera)	F10	5,89
Rejilla ventilación (Rejilla)	F28, F29, F31 F32, F33, F34	29,90
Suelo (Moqueta)	F4, F14, F19 F20, F22, F24	505,20
Techo (Tonga cines – Lana mineral)	F5, F11	1054,83
Ventana de proyección (Cristal)	F35	2,18

Tabla. XV. Superficies del modelo: Material inicial, dimensiones y superficie

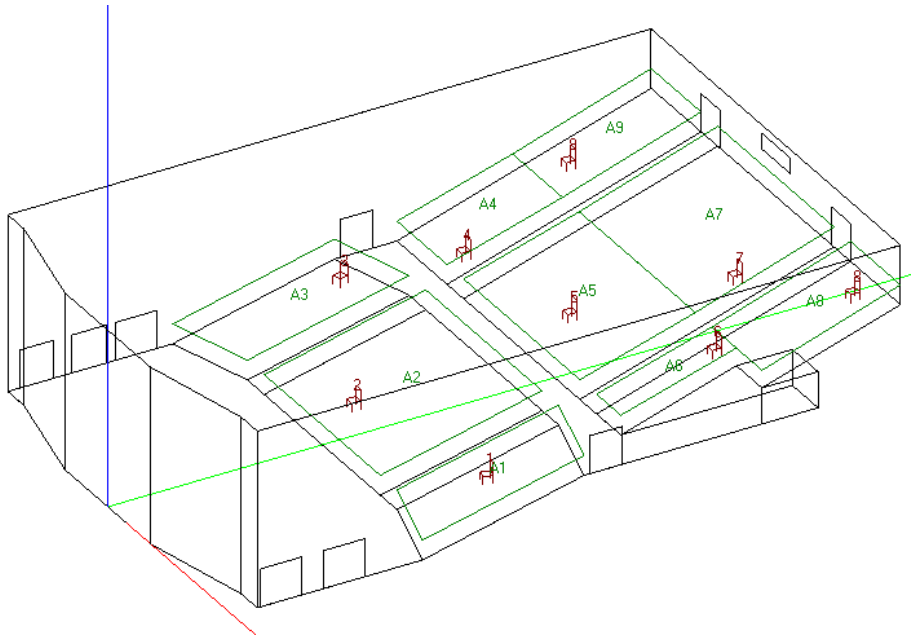


Figura 25. Modelo de la sala creado en EASE 4.3

En cuanto a las zonas de audiencia, se han creado tantas zonas de audiencia como posiciones de micrófono fueron elegidas y se han numerado acorde con éstas. A la hora de incluir estas zonas se ha simplificado el modelo no teniendo en cuenta que algunas de las filas de la sala no tienen todas las butacas, como son los laterales de las primeras filas o la zona reservada para sillas de ruedas. En la Figura 26, se muestra esta simplificación así como las zonas que en la sala real no tienen butacas.

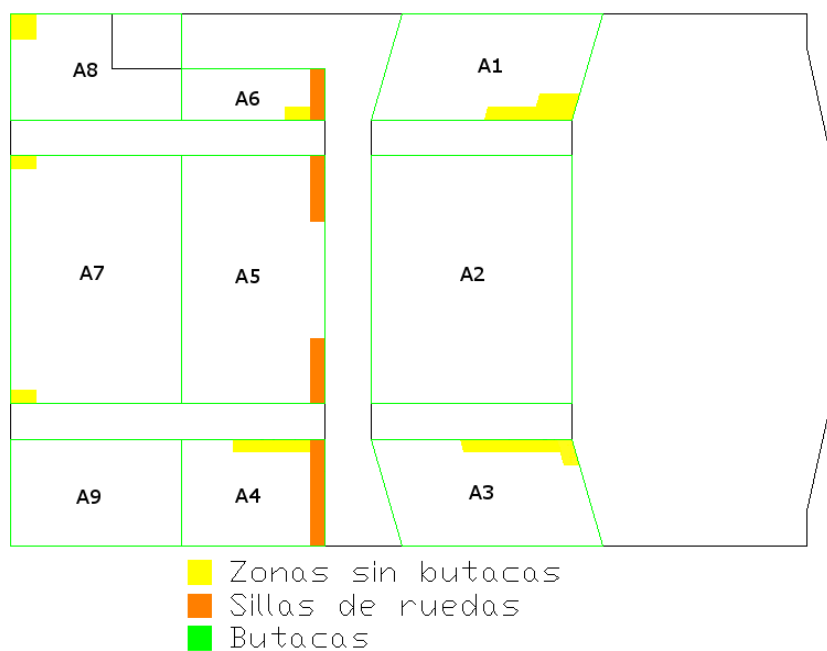


Figura 26. Zonas de audiencia creadas y zonas sin butacas (amarillo y naranja)

### 5.2.2. Validación del modelo

El proceso de validación del modelo consiste en la comprobación de los distintos parámetros medidos con los simulados en diferencias apenas perceptibles (JND). Si el valor simulado difiere del medido en más de un JND (5% para el tiempo de reverberación), se pueden modificar los materiales de la sala hasta que esta diferencia sea menor. Aunque como se comentó en el apartado XXXX, algunos autores lo desaconsejan. En este apartado se presentan tres modelos previos a la validación final, pero se han realizado más modelos intermedios para observar el comportamiento de las distintas superficies e intentar conseguir un modelo que realmente refleje lo mejor posible la sala.

Para el ajuste se han tomado los valores de T30 en tercios de octava medidos con barrido de frecuencias eliminando los valores extraños mediante el Criterio de Chauvenet. Se han seleccionado estos valores de T30 porque el barrido sinusoidal es el tipo de señal que presenta menor número de medidas con valores bajos de INR. Además el valor promedio de T30 por banda de tercio de octava quitando o no los datos dudosos no presenta diferencias perceptibles en ninguna banda. Al compararlo con los valores obtenidos con la señal MLS se obtienen diferencias superiores a un JND en 2500 Hz (1,51 jnd) tomando todos los valores y no presenta diferencias si se eliminan todos los datos no fiables. La comparación de la opción elegida con el resto de posibilidades se muestra en la Figura 27.

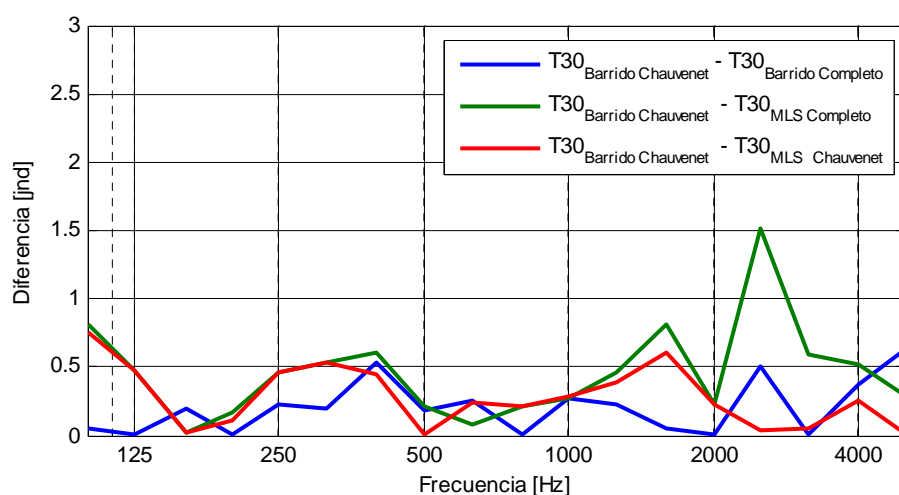


Figura 27. Diferencias entre los tiempos de reverberación (T30) medidos

Como no se conocen los materiales de la sala se ha realizado una primera simulación con los materiales “típicos” de salas de cine que se planteaban en la Tabla. XV, cambiando el panel DIN por un panel perforado. Como se puede ver en la Figura

28, ha sido necesario incluir este material ya que tiene poca absorción en alta frecuencia y con ello se compensa la absorción del techo. Así se acercan los valores de T30 estadísticos a los medidos. Este tipo de material no es usual en salas de cine. En éste y en el resto de modelos se ha supuesto que tanto el techo como las paredes son una única superficie cubierta por un único material, pero es posible que estén divididas por tramos. En este primer ajuste no se consiguen materiales que permitan obtener diferencias menores a 1 JND en todas las bandas de frecuencias, alcanzando los 2,7 JND en 800 Hz, lo que equivale aproximadamente a una diferencia de 80ms con respecto del valor medido.

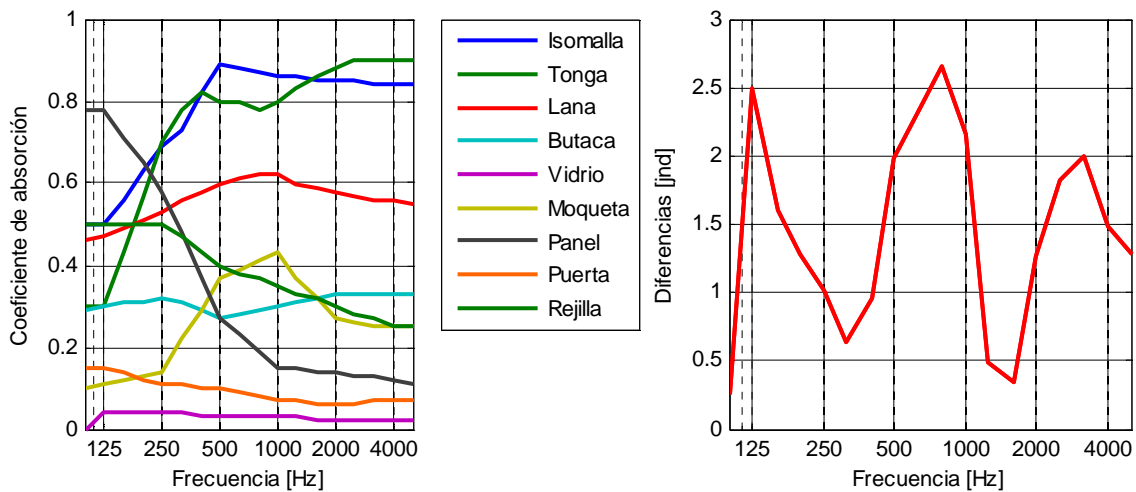


Figura 28. Coeficientes de absorción de los materiales utilizados (izquierda) y diferencias entre T30 medido y simulado (derecha)

Debido a que las desviaciones calculadas, que se presentan en el apartado 6.1.3 se encuentran entre 50 ms y 100 ms y como no se conoce la respuesta de estos materiales en la sala se realiza un cálculo de T30 con el módulo AURA que combina las técnicas de trazado de rayos y fuentes imagen. Los resultados en este caso son mucho peores de lo esperado llegando a diferencias de más de 20 JND, especialmente en la zona de media y alta frecuencia donde T30 alcanza valores en torno a 1,2 s frente a los 0,7 s esperados como se aprecia en la Figura 30.

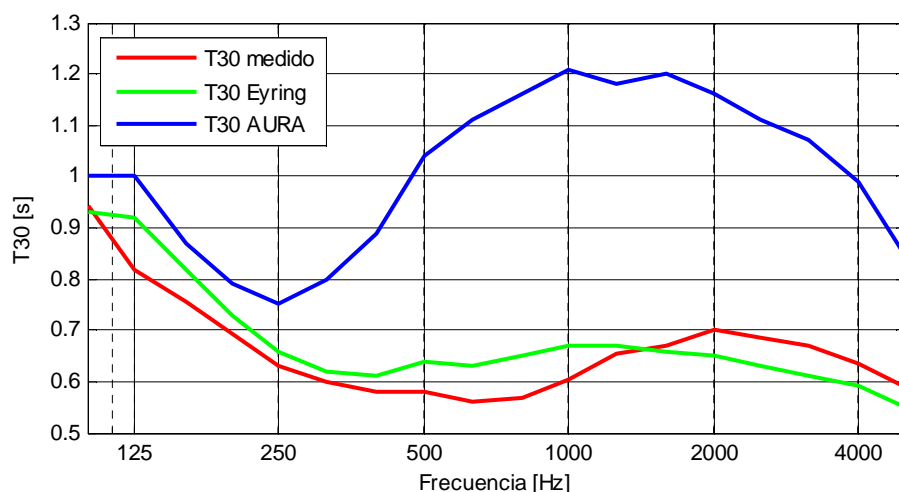


Figura 29. Tiempo de reverberación para el primer modelo realizado

Se realiza una segunda prueba modificando los materiales de las paredes laterales y el techo según la Tabla. XVI. En este caso se ha reducido la absorción del techo y aumentado la de las paredes. Con este ajuste se consigue una validación "perfecta" por el método estadístico no habiendo diferencias superiores a 1 JND en ninguna de las bandas como se muestra en la Figura 30.

Material Anterior	Material Nuevo	Superficie
Tonga Cines	Panel perforado con material absorbente	Techos
Panel perforado	Fibra de vidrio	Paredes laterales

Tabla. XVI. Materiales modificados en la segunda prueba de simulación

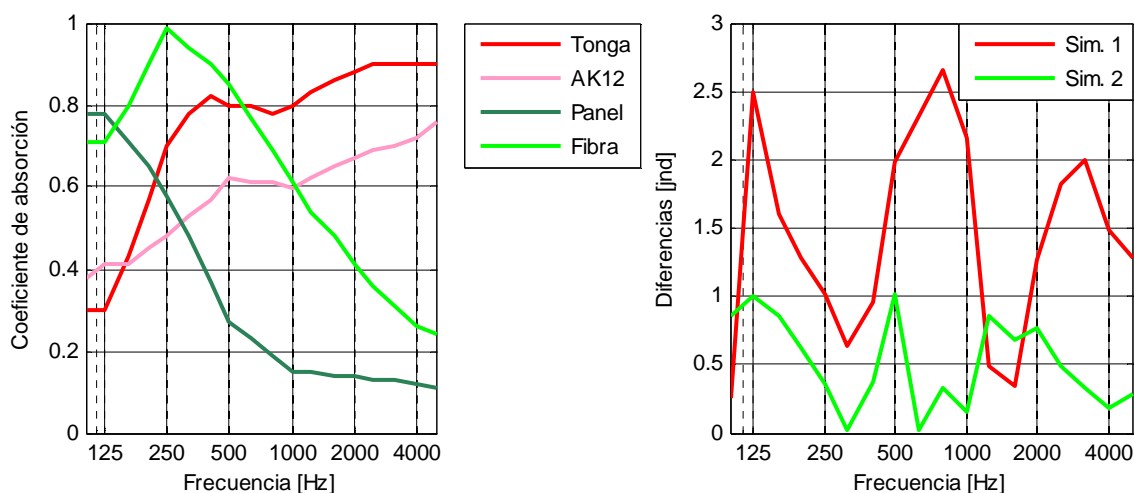


Figura 30. Coeficientes de absorción de los materiales (izquierda) y diferencias entre T30 medido y simulado para las 2 primeras pruebas (derecha)

Con esta validación, que a priori parece correcta, se comprueba que ocurre al realizar un trazado de rayos. Como se observa en la Figura 31, las diferencias en este caso son menores que en el modelo anterior, pero siguen superando los valores de JND recomendados (además de tener una diferencia especialmente alta a partir de la banda de 1000 Hz). Con estos cambios se ha comprobado que las reflexiones en las paredes laterales son las más perjudiciales y hacen que aumente el tiempo de reverberación en media y alta frecuencia. Por ello, se realiza un tercer modelo en el que la absorción de las paredes sea superior.

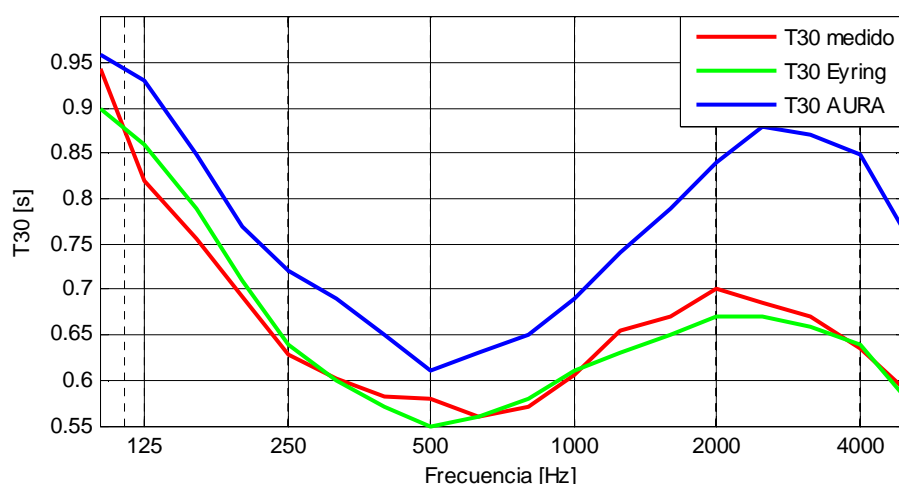


Figura 31. Tiempo de reverberación para el segundo modelo

Durante la tercera prueba se reduce aún más la absorción del techo y aumenta la de las paredes como se observa en la Figura 32. Con estos cambios los materiales se van poco a poco alejando de materiales habituales para salas de cine, pero se podrían buscar materiales reales con comportamiento similar al necesario que combinando distintas fibras o lanas con cámaras de aire.

Material Anterior	Material Nuevo	Superficie
Panel Perforado	Panel Spandex con cámara de aire	Techos
Fibra de vidrio	Panel Arbosilicato	Paredes laterales

Tabla. XVII. Materiales modificados en la tercera prueba de simulación

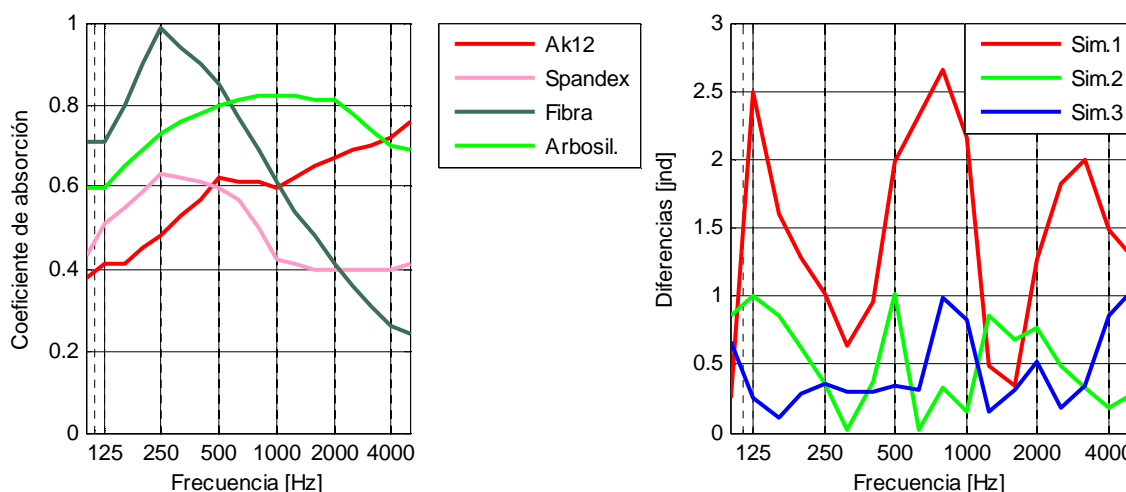


Figura 32. Coeficientes de absorción de los materiales (izquierda) y diferencias entre T30 medido y simulado para las 3 primeras pruebas (derecha)

Como se puede apreciar con estos materiales también se consigue una validación estadística, pero al realizar las medidas con AURA el valor de T30 es muy alto en baja frecuencia como se ve en la Figura 33. Las diferencias son superiores a 100 ms en las bandas de 125 Hz a 1000 Hz y se ajusta correctamente en frecuencias superiores. Aunque no se está buscando un ajuste perfecto ya que no es posible debido a las desviaciones de los parámetros, la simplificación de la sala, las incertidumbres de los coeficientes de absorción de los materiales... Se buscan unas diferencias razonables que no superen los 2,0 o 2,5 JND en ninguna de las bandas para el tiempo de reverberación.

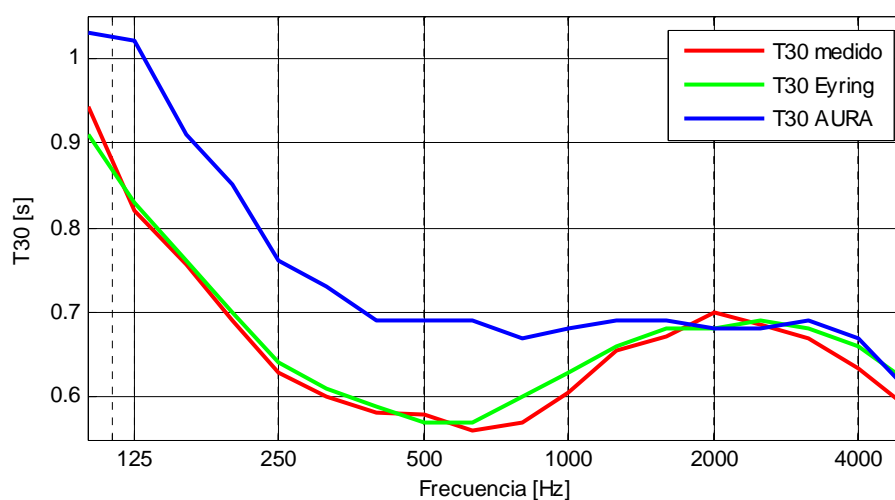


Figura 33. Tiempo de reverberación para el tercer modelo

Viendo los materiales utilizados en las tres simulaciones y sus resultados se decide buscar materiales que se ajusten en alta frecuencias a los puestos en el tercer modelo con mayor absorción en baja frecuencia. Se va a permitir en este modelo final



un pequeño desajuste del tiempo de reverberación de Eyring, ya que todas las simulaciones se realizarán con el módulo AURA. Para ello se cambian los paneles de spandex del techo por unos paneles de rejilla de madera que absorben un poco más en baja frecuencia, pero tienen igual comportamiento en alta como se muestra en la Figura 34. Con este cambio se pierde la validación estadística “perfecta” con diferencias entre 0,2 y 2,5 en todas las bandas, pero se consigue que los valores obtenidos con AURA sean mucho más próximos a los medidos y con diferencias inferiores a 2.

Material Anterior	Material Nuevo	Superficie
Panel Spandex	Rejilla madera	Techos

Tabla. XVIII. Materiales modificados en la tercera prueba de simulación

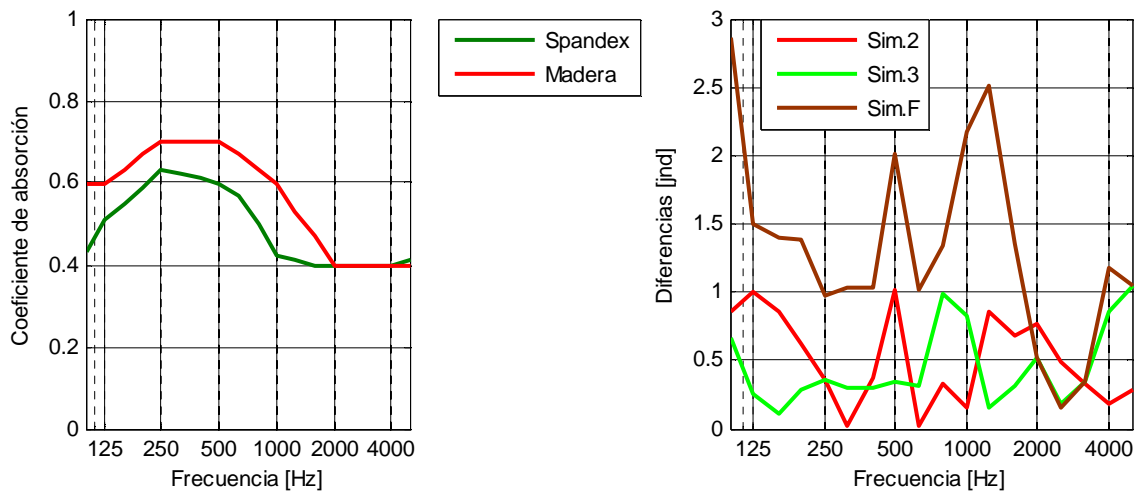


Figura 34. Coeficientes de absorción de los materiales (izquierda) y diferencias entre T30 medido y simulado para las 3 primeras pruebas (derecha)

El tiempo de reverberación obtenido con este último modelo se presenta en la Figura 35. Hay una diferencia de 100 ms entre los valores calculados por Eyring y los calculados mediante AURA en baja y media frecuencia, siendo el valor medido en la sala un valor intermedio.

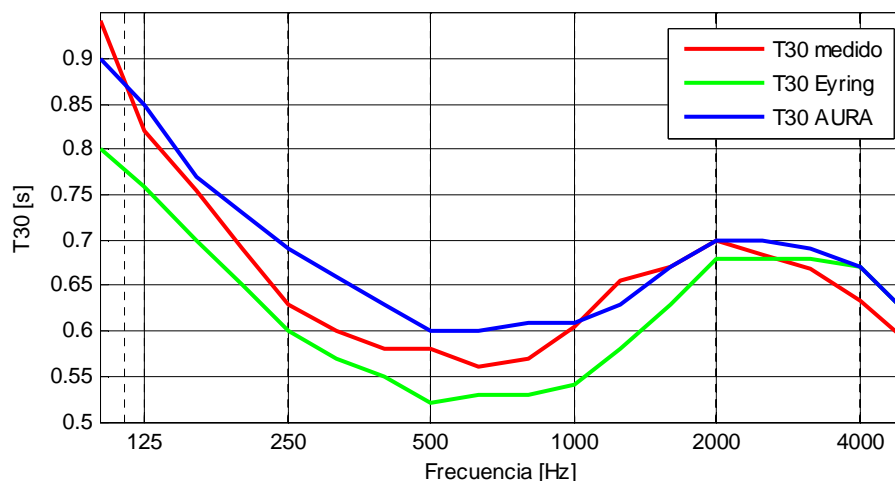


Figura 35. Tiempo de reverberación del modelo final

Con todas estas comprobaciones se puede concluir que si no se conocen los materiales reales de la sala ni las superficies que cubren cada uno de ellos, es muy difícil la validación de un modelo. Además, no es posible utilizar únicamente el método de validación estadística ya que existen múltiples combinaciones de materiales que cumplen las condiciones.

Para comprobar que esta validación da resultados más o menos fiables se han comparado los promedios de los parámetros medidos con fuente omnidireccional y los simulados. Como se observa Figura 36 y la Tabla. XIX, los parámetros que más se asemejan a los medidos son  $T_{20}$  que presenta diferencias menores a 2 JND en todas las bandas menos 125 Hz y 200 Hz,  $T_s$  con diferencias menores a 1 JND en frecuencias medias y altas o  $D_{50}$  con diferencias pequeñas en frecuencias medias. El parámetro con mayores diferencias es LF que supera los 2 JND en todas las bandas.

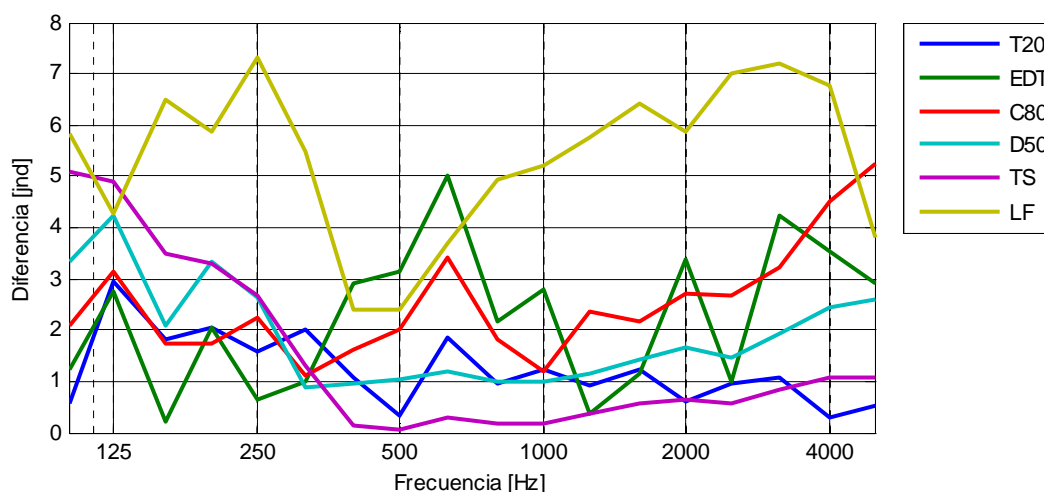


Figura 36. Diferencias entre los promedios medidos y los promedios simulados

Diferencia [jnd] / FREQ. [Hz]	T20	T30	EDT	C80	D50	Ts	LF
100	0,6	0,8	1,2	2,1	3,3	5,1	5,8
125	2,9	0,6	2,7	3,1	4,2	4,9	4,3
160	1,8	0,4	0,2	1,7	2,1	3,5	6,5
200	2,1	1,0	2,0	1,7	3,3	3,3	5,9
250	1,6	1,8	0,6	2,2	2,6	2,7	7,3
315	2,0	2,0	1,0	1,1	0,9	1,3	5,5
400	1,1	1,8	2,9	1,6	0,9	0,1	2,4
500	0,3	0,6	3,1	2,0	1,0	0,0	2,4
630	1,9	1,6	5,0	3,4	1,2	0,3	3,7
800	0,9	1,4	2,2	1,8	1,0	0,2	4,9
1000	1,2	0,3	2,8	1,2	1,0	0,2	5,2
1250	0,9	0,6	0,4	2,3	1,1	0,4	5,8
1600	1,2	0,0	1,2	2,2	1,4	0,6	6,4
2000	0,6	0,0	3,4	2,7	1,7	0,7	5,9
2500	0,9	0,3	1,0	2,7	1,5	0,6	7,0
3150	1,1	0,6	4,2	3,2	1,9	0,8	7,2
4000	0,3	1,1	3,5	4,5	2,4	1,1	6,8
5000	0,5	1,1	2,9	5,2	2,6	1,1	3,8

Tabla. XIX. Diferencias [JND] entre los valores medidos y los valores simulados

Por último, se ha comparado T30 punto a punto para comprobar si los resultados por posiciones no se alejan demasiado de los medidos y dar por concluida la validación del modelo. En la Tabla. XX se muestran las diferencias entre el T30 promedio por punto medido y simulado en JND. En la mayoría de los puntos no supera los 2 JND de diferencia y las diferencias más altas se presentan sobre todo en frecuencias bajas donde la desviación de los datos medidos es mayor.

Se ha dado por validado el modelo, con el ajuste intermedio entre los valores estadísticos y los valores calculados por el método geométrico.

Posición / FREC. [Hz]	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
100	3,4	2,3	3,1	1,5	1,7	1,3	1,5	1,4	1,3
125	0,7	0,4	0,5	0,1	1,9	0,3	1,5	3,9	0,2
160	1,1	0,6	0,7	0,0	1,3	1,8	0,7	0,6	0,2
200	1,4	1,3	0,7	1,1	2,4	0,7	0,1	5,0	0,8
250	2,5	3,5	0,4	0,8	0,8	2,4	1,9	4,6	2,3
315	1,0	1,0	0,7	1,3	4,1	3,4	2,4	3,3	2,3
400	0,9	0,6	1,8	2,3	0,9	1,7	3,0	2,1	1,6
500	0,4	1,0	2,0	0,5	1,2	1,1	1,9	0,2	0,6
630	2,3	0,1	1,5	1,3	2,5	1,6	2,7	2,1	2,8
800	3,0	1,9	1,4	0,5	3,3	1,7	0,7	1,1	2,5
1000	1,6	1,1	2,0	2,5	1,6	1,2	1,1	1,3	1,0
1250	0,7	0,8	0,7	2,2	0,3	0,0	0,4	0,2	0,3
1600	0,4	1,3	0,9	0,1	0,8	1,0	0,1	0,2	0,7
2000	0,7	1,0	0,5	0,0	1,7	1,8	0,4	0,2	0,9
2500	0,6	0,2	0,1	1,0	1,1	1,2	1,0	0,3	1,4
3150	1,0	0,8	0,2	1,2	1,9	1,0	2,3	1,9	2,5
4000	0,1	0,4	0,3	0,7	1,7	2,1	2,3	0,9	2,8
5000	0,7	0,8	0,0	0,3	1,6	6,0	2,7	0,9	1,1

Tabla. XX. Diferencias [JND] entre el promedio de T30 medido y simulado mediante AURA por posición de micrófono

### 5.2.3. Procesado de los datos

Los datos de la simulación se han tratado de manera similar a los datos de las mediciones. Tras la validación del modelo e incorporar los niveles de ruido medidos en la sala que cumplen la exigencia de la curva NC-25 (ver Figura 37), se han obtenido mediante el módulo AURA los datos de los distintos parámetros en función de las posiciones de la fuente y el receptor, tanto para una fuente omnidireccional como para el sistema de refuerzo sonoro de la sala.

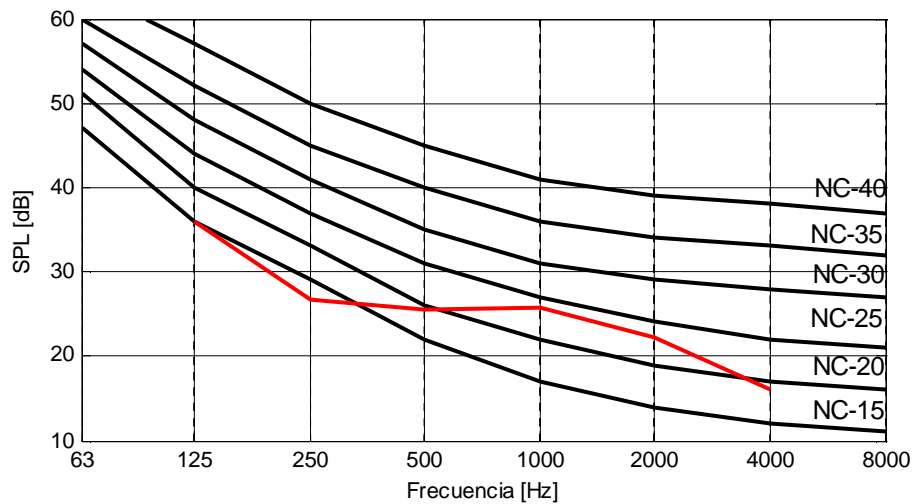


Figura 37. Nivel de ruido en la sala

Estos datos se han incluido en un archivo Excel que ha sido exportado a MatLab para poder realizar el procesamiento con los archivos creados anteriormente y obtener resultados equivalentes. Por lo tanto, se han obtenido los promedios para toda la sala a partir de los datos de los datos de cada una de las posiciones de fuente y micrófono, los promedios zonales a partir de los datos en cada una de las posiciones de micrófono, los valores globales, etcétera.

Aprovechando las posibilidades que brinda la simulación se han incluido algunos mapas de la sala para comprobar la distribución espacial de los parámetros.



# **6 Resultados de las mediciones**





## 6.1. Fuente Omnidireccional

En la primera sesión de medición realizada el 20 de marzo de 2014, la temperatura y de la sala era de 20,1° y la humedad relativa del 33,6%.

### 6.1.1. Comprobación de la relación impulso-ruido

No ha sido posible conseguir valores de INR suficientemente altos como para garantizar que todas las medidas de T20 y T30 sean fiables, esto se produce principalmente en la banda de 100 Hz. En el caso de trabajar en bandas de octava, se pueden garantizar los resultados de T20 en todas las bandas, ya que el valor de INR supera los 35 dB. No se puede decir lo mismo en el caso de T30, para el punto M7 y la banda de 125 Hz no supera los 45 dB en ninguna de las combinaciones fuente-micrófono ni con ninguna de las señales de excitación. Lo mismo ocurre para el punto M5 y la señal MLS cuando la fuente se encuentra en las posiciones 2 y 3. En frecuencias altas, sólo la banda de 2000 Hz con la combinación F1-M8 y señal MLS presenta menos de 45 dB. Los valores de INR de las bandas que presentan problemas se recogen en la Tabla. XXI.

	Fuente 1 – MLS		Fuente 1 - Barrido		Fuente 2 - MLS		Fuente 2 - Barrido		Fuente 3 - MLS		Fuente 3 - Barrido	
Micrófono / Frec.[Hz]	125	2000	125	2000	125	2000	125	2000	125	2000	125	2000
5	45	56	47	53	44	55	46	59	44	56	48	59
7	40	54	43	59	41	46	44	58	39	52	43	56
8	47	41	46	57	46	52	47	55	45	52	48	55

Tabla. XXI. Valor de la relación impulso-ruido (INR) en las bandas que presentan niveles inferiores de los recomendados

En bandas de tercio de octava, la situación empeora, ya que para el punto M7 y la fuente en la posición 1 no se alcanzaron los 35 dB necesarios para calcular T20. Si se analizan los datos obtenidos con la señal MLS, solamente 4 de las 27 combinaciones en la banda de 100 Hz tienen un valor de INR mayor a 45 dB. También presenta algunos valores bajos en la banda de 125 Hz, caso que se repite en el punto M7 para dos posiciones de fuente. Con el barrido sinusoidal los resultados son bastante mejores, aunque sigue presentando problemas la banda de 100Hz. Los

valores problemáticos de cada banda de tercio de octava se muestran en la Tabla. XXII y la Tabla. XXIII.

	Fuente 1 -MLS			Fuente 2 - MLS	Fuente 3 –MLS			
<b>Micrófono / Frec.[Hz]</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>
1	46	50	49	45	44	54	49	50
2	39	54	56	39	39	51	52	52
3	44	56	44	45	40	53	54	53
4	44	50	53	37	40	50	53	53
5	35	42	52	36	37	52	53	54
6	42	51	56	44	42	45	47	48
7	28	40	50	31	35	44	51	50
8	44	49	46	40	40	45	54	52
9	46	45	51	40	33	42	36	43

Tabla. XXII. Valores de la relación impulso-ruido para las distintas combinaciones utilizando señal MLS

	Fuente 1 - Señal Barrido		Fuente 2 - Señal Barrido	Fuente 3 - Señal Barrido
<b>Micrófono / FREC.[Hz]</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	45	57	45	41
5	42	43	40	43
6	45	49	44	45
7	31	45	36	38
8	41	49	43	44

Tabla. XXIII. Valores de la relación impulso-ruido para las distintas combinaciones utilizando barrido de frecuencias

Por lo tanto, los datos serán menos fiables en la banda de 100 Hz, especialmente para la excitación con señal MLS, y el punto M7 donde por los valores de INR no se podría calcular ni siquiera T20. Aún así se van a utilizar esos valores a no ser que se descarten por el Criterio de Chauvenet.

### 6.1.2. Diferencias en T20 , T30 y EDT promedio de la sala aplicando o no el Criterio de Chauvenet

Se van a estudiar las diferencias en T20, T30 y EDT promedio de la sala utilizando todos los valores medidos o eliminando los valores erróneos tras realizar 3 iteraciones del Criterio de Chauvenet. Si se trabaja en bandas de octava, sólo aparecen diferencias perceptibles entre aplicar o no el Criterio de Chauvenet en el cálculo del valor de EDT en la banda de 250 Hz medida con la señal MLS (1,3 JND). El parámetro que menores diferencias presenta es T30 con valores menores a 0,4 JND, lo que suponen diferencias menores a 14 ms entre eliminar o no los valores extraños. Esto se puede observar en la Figura 38.

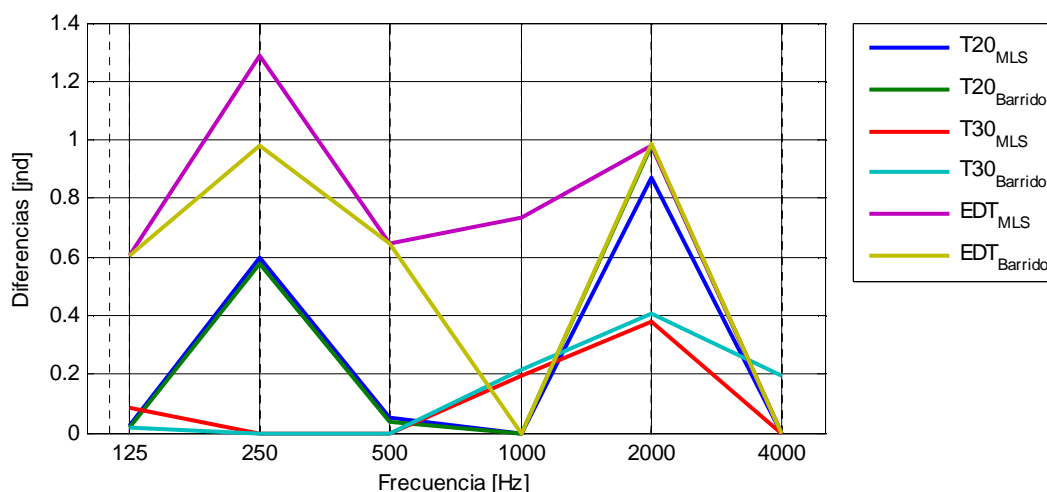


Figura 38. Diferencias entre los tiempos de reverberación medios de la sala utilizando o no el criterio de Chauvenet

El Criterio de Chauvenet elimina mayor número de valores en el caso de trabajar en tercios de octava por lo que las diferencias son algo mayores que en el caso anterior. Tanto para T20 como para T30 las medidas realizadas con barrido sinusoidal no presentan diferencias apreciables entre eliminar o no algunos de los valores obtenidos. Si se observa la Figura 39, se aprecian estas diferencias que son de 39 ms (1,2 JND) para la bandas de 1250 Hz en el caso de T20 y de 50 ms (1,5 JND) para T30. Es más conflictivo EDT ya que presenta diferencias en varias bandas para ambas señales de excitación. Las diferencias son menores de 50 ms para todas las bandas excepto la banda de 1600 Hz (72 ms) para la señal de barrido y 3150 Hz (93 ms) para ambas señales.

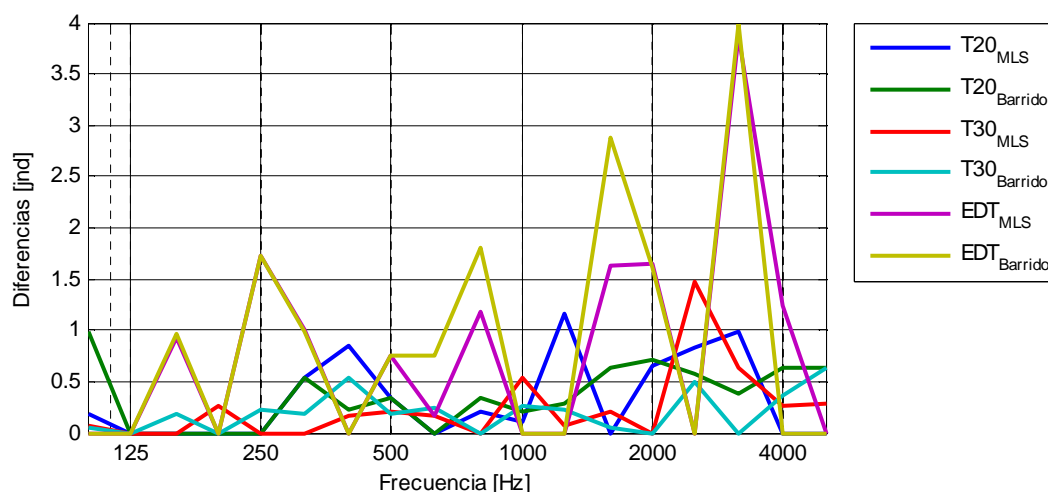


Figura 39. Diferencias entre T20, T30 y EDT medios utilizando todos los valores o sólo los "correctos"

La comparación de las señales ha demostrado que los datos obtenidos con barrido sinusoidal presentan una dispersión menor que con señal MLS, ya que se produce la eliminación de menor número de valores, pero no hay suficiente diferencia con la señal MLS como para decir que el barrido es mejor método de excitación.

### 6.1.3. Promedios de la sala

Se ha realizado el promediado de todos los parámetros medidos. Hay que tener en cuenta la gran variabilidad espacial de algunos de ellos, como pueden ser la Claridad o la Fracción de Energía Lateral, las cuales presentan una desviación estándar similar al valor promedio en baja frecuencia. Por ello en el apartado 6.1.4 se expondrán los resultados zonales. En la Figura 40, se representan las diferencias existentes entre el valor promedio de los distintos parámetros medidos con señal MLS y con barrido sinusoidal. Estas diferencias son menores de 1 JND para todos los parámetros excepto para EDT que muestra diferencias de 2,45 JND (0,061 s) en la banda de 1600 Hz. Sólo se van a presentar en forma de tabla los valores correspondientes a las mediciones con barrido.

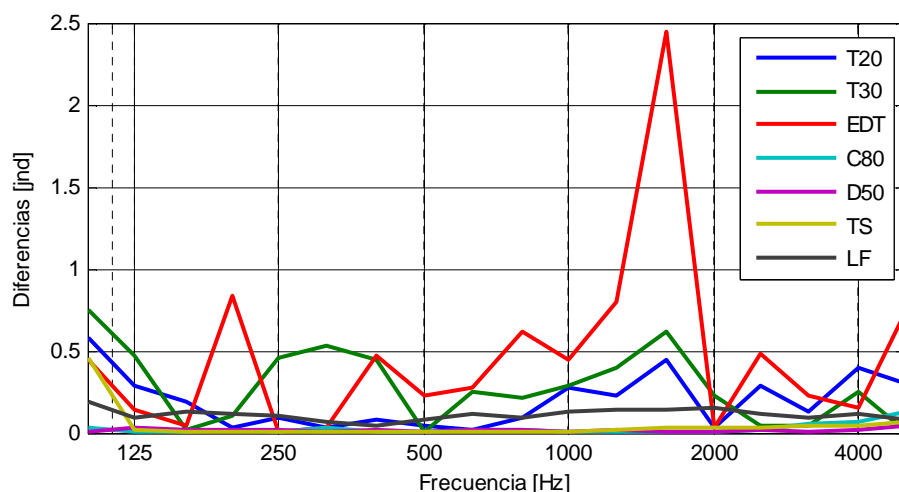


Figura 40. Diferencias entre los promedios de los parámetros medidos con las señales MLS y barrido

La Tabla. XXIV contiene los valores de reverberación de la sala que están comprendidos entre 0,5 s y 1,0 s con unos valores similares para T20 y T30 pero con menor desviación en el último. Para T20, las máximas desviaciones se presentan en baja y alta frecuencia y disminuyen especialmente en la zona de frecuencias medias (entre 400 Hz y 800 Hz). Para T30, a partir de 160 Hz son menores a los 76 ms. El tiempo de reverberación inicial (EDT) toma valores entre 0,4 s y 0,8 s con unas desviaciones muy grandes (entre 0,12 s y 0,28 s) en todas las bandas.

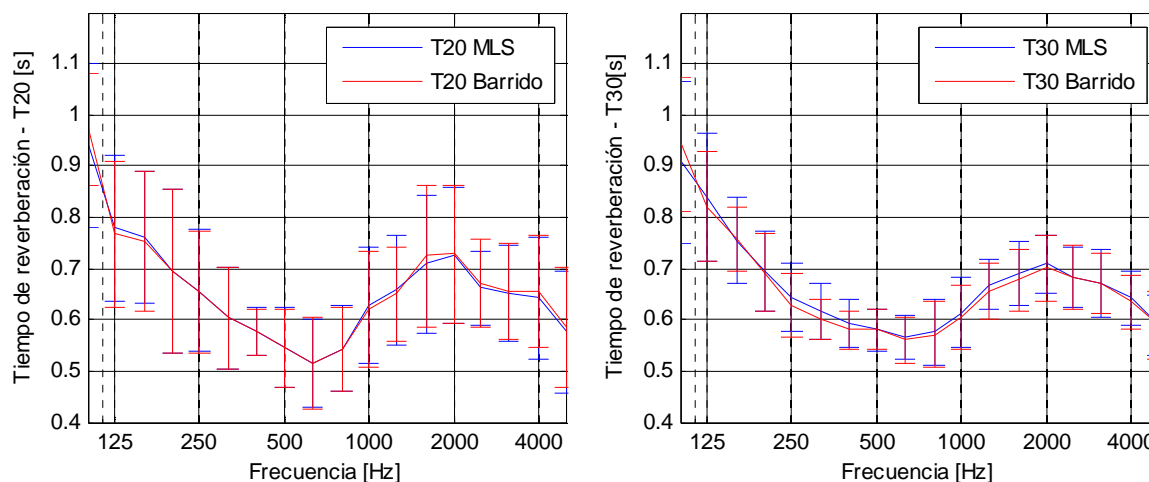


Figura 41. Tiempo de reverberación promedio de la sala

Frec.[Hz]	T20 [s]	$\sigma_{T20}$	T30 [s]	$\sigma_{T30}$	EDT [s]	$\sigma_{EDT}$
100	0,970	0,109	0,943	0,129	0,731	0,259
125	0,768	0,142	0,820	0,107	0,762	0,265
160	0,754	0,137	0,756	0,063	0,602	0,196
200	0,694	0,159	0,691	0,076	0,611	0,214
250	0,654	0,120	0,629	0,063	0,531	0,116
315	0,603	0,098	0,601	0,040	0,528	0,164
400	0,576	0,044	0,581	0,037	0,422	0,185
500	0,546	0,076	0,580	0,039	0,409	0,133
630	0,515	0,089	0,561	0,046	0,376	0,115
800	0,542	0,082	0,570	0,065	0,532	0,175
1000	0,620	0,114	0,605	0,061	0,555	0,225
1250	0,651	0,091	0,656	0,055	0,488	0,231
1600	0,724	0,138	0,670	0,051	0,499	0,207
2000	0,728	0,136	0,701	0,063	0,477	0,168
2500	0,672	0,085	0,685	0,062	0,539	0,275
3150	0,656	0,094	0,670	0,058	0,467	0,214
4000	0,656	0,110	0,634	0,054	0,470	0,231
5000	0,586	0,118	0,589	0,067	0,454	0,224

Tabla. XXIV. Valores de reverberación promedio de la sala

En la Figura 41 se representan gráficamente los valores de T20 y T30 medidos con ambas señales. En ellas se observan las similitudes en ambos promedios y sus desviaciones, así como su comportamiento en frecuencia. El tiempo de reverberación de la sala es mayor en baja frecuencia llegando hasta casi 1 s en la banda de 100 Hz y va disminuyendo según aumenta la frecuencia presentando un valle a los 630 Hz. En estos gráficos se ve claramente que las desviaciones para T30 son menores que para T20.

Para el caso del tiempo de reverberación inicial (EDT) la tendencia de la curva es similar al de las dos anteriores (ver Figura 42), pero más irregular. Las desviaciones son bastante altas, especialmente para las frecuencias a partir de los 1000 Hz cuyo valor es aproximadamente la mitad del valor de EDT.

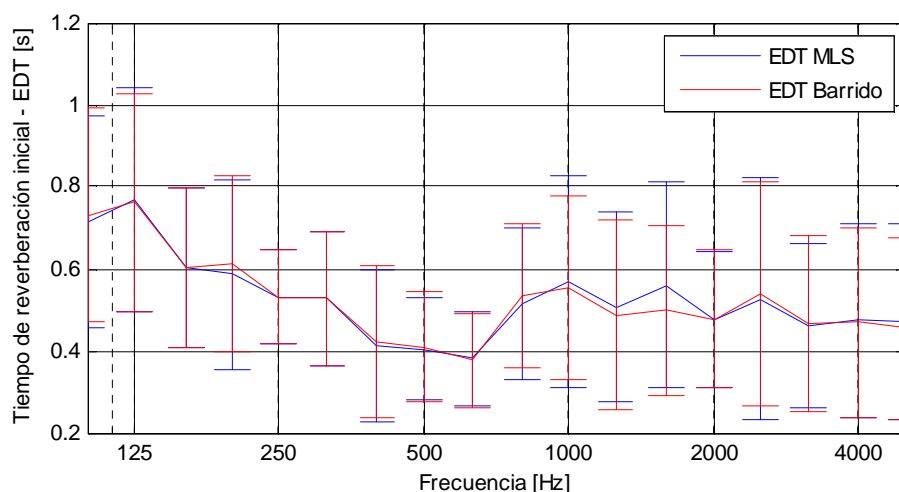


Figura 42. Tiempo de reverberación Inicial – EDT promedio

El resto de parámetros medidos se presentan en la Tabla. XXV, cabe destacar que el valor de la desviación estándar en baja frecuencia es comparable al valor promedio de los datos especialmente para C80 y LF. Si se analizan las curvas de Claridad y Definición se observa el aumento con la frecuencia de ambas (ver Figura 43) y que los valores obtenidos son bastante altos lo que representa un dominio del sonido en los primeros 50 ms y 80 ms para D50 y C80, respectivamente, frente a las reflexiones tardías. Esto conlleva una distinción de los sonidos con bastante precisión y claridad.

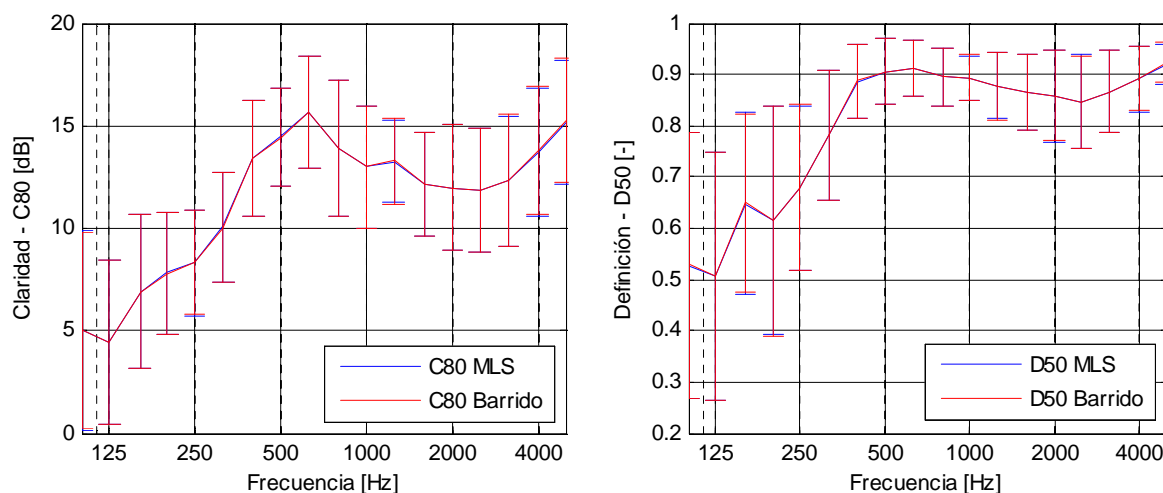


Figura 43. Claridad [dB] y Definición [-] promedio de la sala

Frec.[Hz]	C80 [dB]	$\sigma_{C80}$	D50 [-]	$\sigma_{D50}$	TS [ms]	$\sigma_{TS}$	LF [-]	$\sigma_{LF}$
100	5,06	4,79	0,53	0,26	95,0	23,7	0,45	0,42
125	4,47	4,01	0,51	0,24	89,3	20,4	0,38	0,26
160	6,92	3,75	0,65	0,17	70,6	14,8	0,48	0,34
200	7,80	2,95	0,61	0,22	65,0	14,1	0,44	0,28
250	8,33	2,57	0,68	0,16	55,0	10,0	0,50	0,25
315	10,03	2,66	0,78	0,13	39,6	10,7	0,40	0,23
400	13,43	2,79	0,89	0,07	26,0	8,7	0,24	0,25
500	14,43	2,39	0,91	0,06	22,3	7,1	0,23	0,17
630	15,65	2,75	0,91	0,05	20,4	5,4	0,30	0,17
800	13,86	3,32	0,90	0,06	21,7	4,4	0,36	0,22
1000	12,98	2,97	0,89	0,04	22,2	4,2	0,37	0,24
1250	13,27	2,06	0,88	0,07	22,9	7,0	0,40	0,20
1600	12,16	2,53	0,87	0,07	24,0	7,5	0,44	0,22
2000	11,98	3,06	0,86	0,09	25,7	9,0	0,41	0,21
2500	11,86	2,99	0,85	0,09	27,0	8,9	0,47	0,22
3150	12,35	3,21	0,87	0,08	24,4	8,4	0,49	0,28
4000	13,81	3,14	0,89	0,06	21,8	9,1	0,48	0,32
5000	15,26	3,04	0,92	0,04	19,1	7,1	0,33	0,20

Tabla. XXV. Valores de C80, D50, Ts y LF promedios de la sala

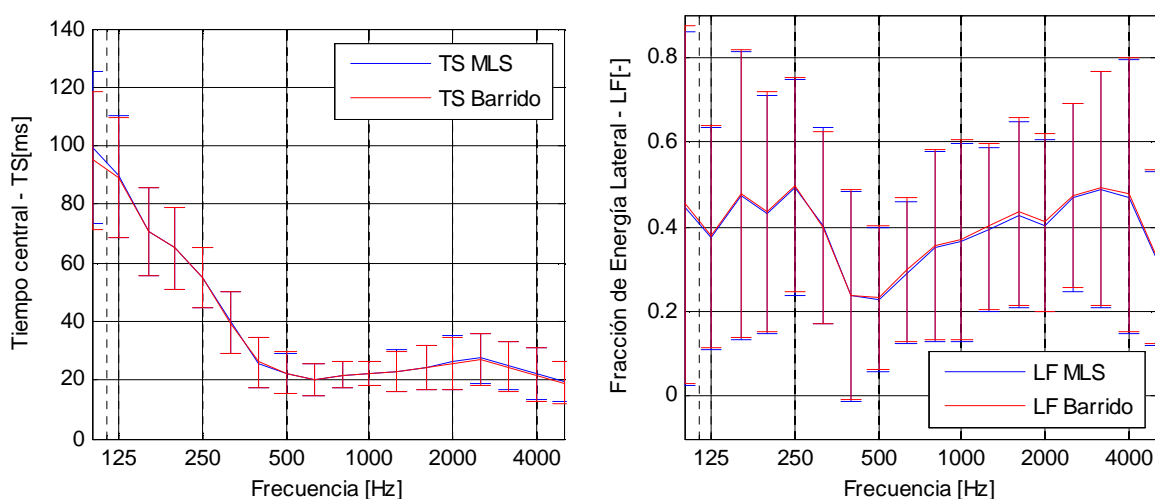


Figura 44. Tiempo Central [ms] y Fracción de Energía Lateral [-] promedio

Si se analiza el Tiempo Central en función de la frecuencia, se puede ver una disminución desde las bandas de 100Hz a 400 Hz pasando de los 95 ms a los 26 ms para después mantenerse entre 25 ms y 20 ms en frecuencias medias y altas. Estos



valores corresponden a la poca reverberación y la gran nitidez de la sala. En la Figura 44 se muestran los valores del Tiempo Central y la Fracción de Energía Lateral. Los valores de LF se presentan como promedio de la sala, aunque es más recomendado expresarlos por zonas ya que dependen en gran medida de la posición del oyente y de la distancia a la fuente. Por este motivo la desviación obtenida es tan alta.

Los promedios de la sala han mostrado que no existen apenas diferencias entre uno u otro tipo de señal de excitación, únicamente las desviaciones para el barrido sinusoidal son algo menores. La sala presenta un tiempo de reverberación bastante bajo, especialmente en media y alta frecuencias, lo que en el análisis de los parámetros subjetivos se ha convertido en valores altos de C80 y D50, y valores bajos de EDT y Ts. Siendo éste el comportamiento de una sala seca y con gran nitidez, lo que ayudará a una alta inteligibilidad.

#### 6.1.4. Promedios por posición de fuente

Si se promedian los datos por posición de fuente, se obtiene que apenas hay diferencias en el tiempo de reverberación entre unas y otras posiciones, como se observa en la Figura 45. Las diferencias más altas, cercanas a los 100 ms, se presentan en la banda de 125 Hz tanto para T20 como para T30 y las menores, aproximadamente 10 ms, en frecuencias medias en torno a los 500 Hz. Para EDT las diferencias son mucho mayores, algo previsible debido a las desviaciones obtenidas. Se obtienen los valores mínimos para casi todas las bandas con la Fuente 1 y los máximos con la Fuente 3.

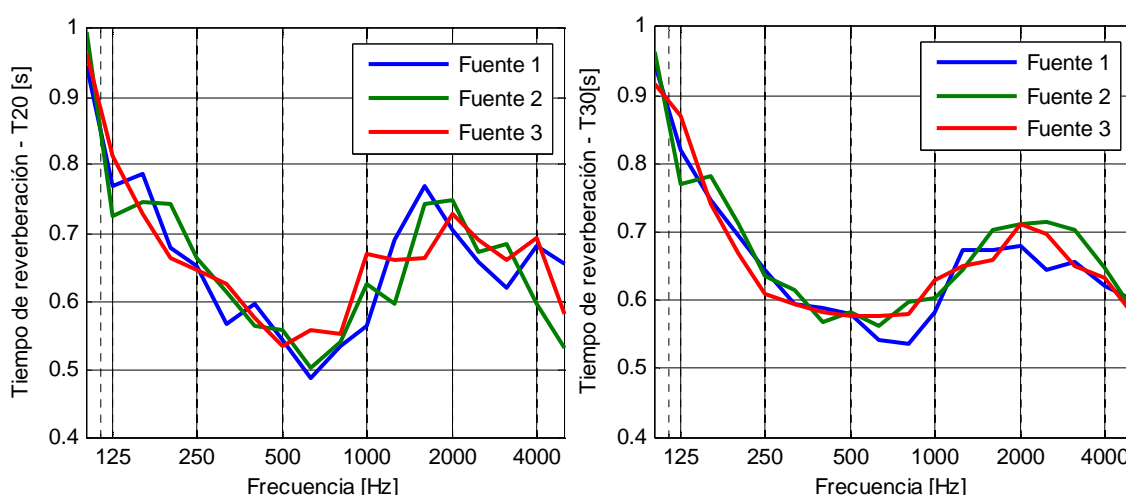


Figura 45. Tiempo de reverberación promedio por posición de fuente

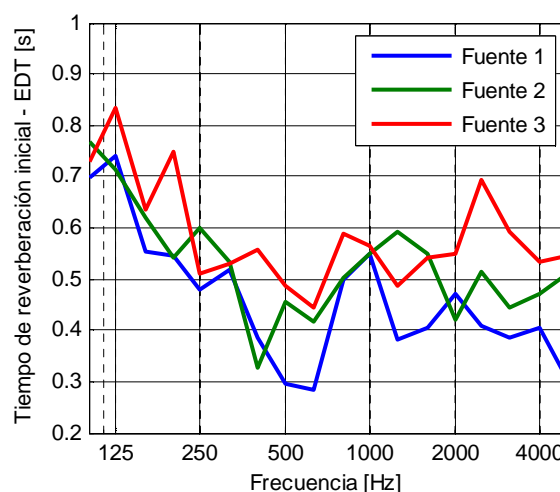


Figura 46. EDT promedio por posición de fuente

Para la D50, los valores mayores los proporciona la Fuente 1, que se corresponden con los valores bajos de reverberación percibida, y los menores la Fuente 3. Hay diferencias significativas en algunas bandas como la banda de 200 Hz con diferencias de 3,71 dB para C80 y 0,28 para D50 o en alta frecuencia para 2500 Hz con diferencias de 3,38 dB y 0,13.

Las bandas con mayores diferencias se repiten en el caso de TS como se muestra en la Figura 48. Entre la Fuente 2 y la Fuente 3 no hay diferencias perceptibles ya que son menores a 10 ms, mientras que las Fuentes 1 y 3 presentan diferencias de más de 10 ms en 6 de las 18 bandas. Los valores de LF para cada una de las fuentes son muy diferentes ya que dependen de la posición de la fuente y el micrófono.

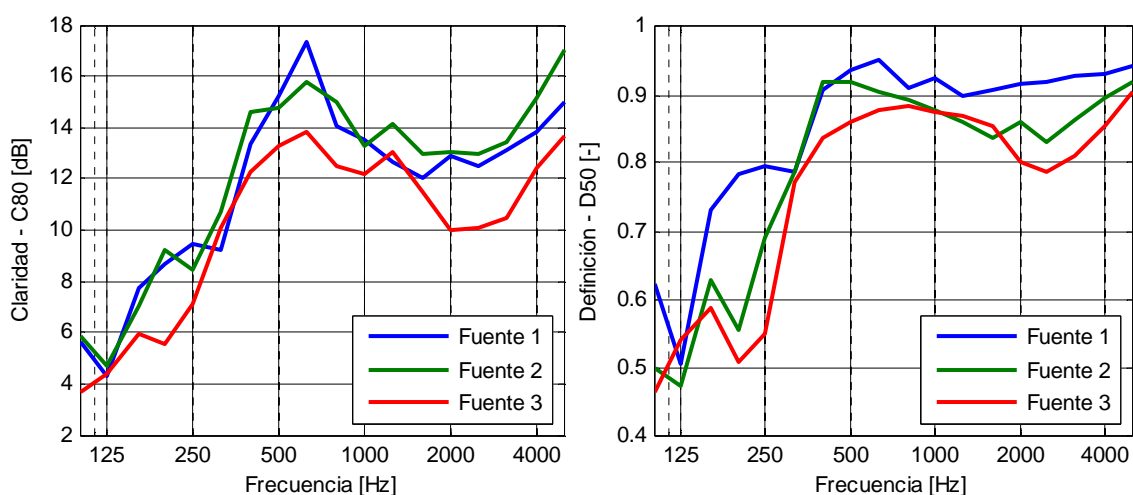


Figura 47. Claridad y Definición por posición de fuente

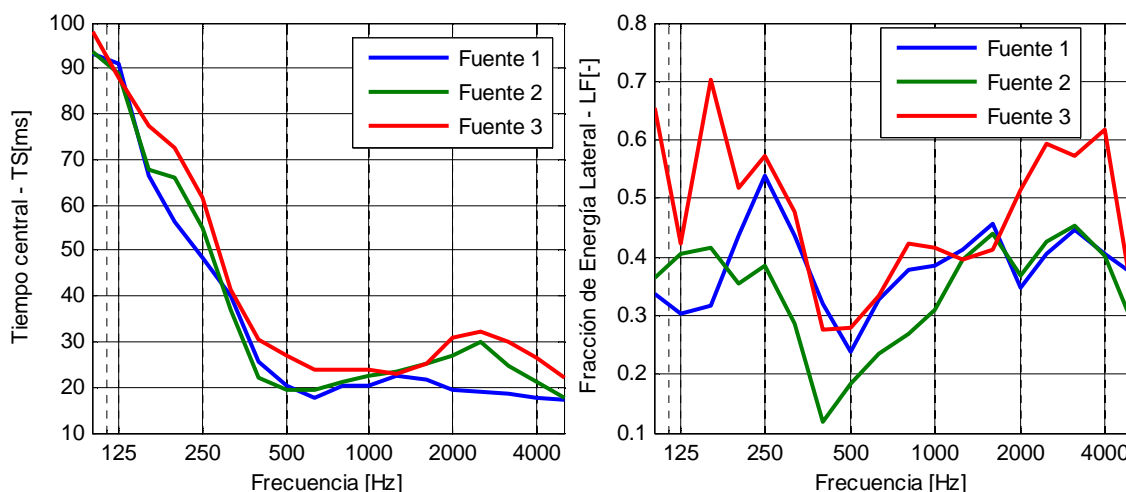


Figura 48. TS y LF promedio por posición de fuente

Por tanto, se han visto que existe una ligera influencia en la posición de fuente elegida ya que donde F1 toma los mayores valores F3 toma los menores para los parámetros como EDT, C80 y D50.

### 6.1.5. Promedios por zonas

Antes de presentar los parámetros por zonas, se van a comparar los datos de cada zona para ambas señales. Para la posición M5, que es la posición central de la sala, no hay diferencias entre utilizar uno u otro tipo de señal para los parámetros subjetivos, aunque si se encuentran diferencias en la banda de 100 Hz para T20 y 315 Hz para T30. En cambio, no se puede decir lo mismo en el resto de posiciones ya que las diferencias son bastante mayores. Se van a analizar los datos parámetro a parámetro empezando por el tiempo de reverberación.

En el caso de T20 las diferencias más grandes se producen en los puntos M3 y M4 lo cual se repetirá para el resto de parámetros. En estas zonas hay grandes diferencias entre los valores obtenidos con la señal MLS y con Barrido, especialmente para la banda de 200 Hz con diferencias entre 100 ms y 200 ms. En el resto de puntos las diferencias son inferiores a 2,2 JND, es decir, las diferencias son inferiores al 11 %. Para la banda de 100 Hz en el punto M9 se obtienen unas diferencias muy grandes. En la Figura 49 se muestran estas diferencias.

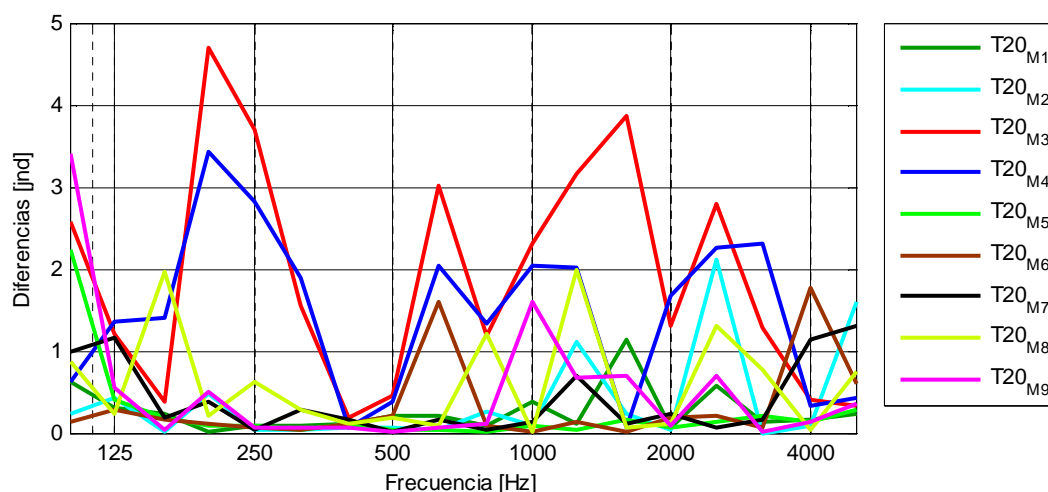


Figura 49. Diferencias entre los valores de T20 medidos para cada zona y tipo de señal (T20 barrido - T20 MLS)

El tiempo de reverberación T30 presenta diferencias un poco menores a las de T20, especialmente en las posiciones M3 y M4 ya que no superan los 4 JND en ninguna banda. Un 92% de las diferencias calculadas no son perceptibles y son inferiores a aproximadamente 35 ms. Las diferencias de cada una de las posiciones entre utilizar uno u otro tipo de señal se presentan en la Figura 50.

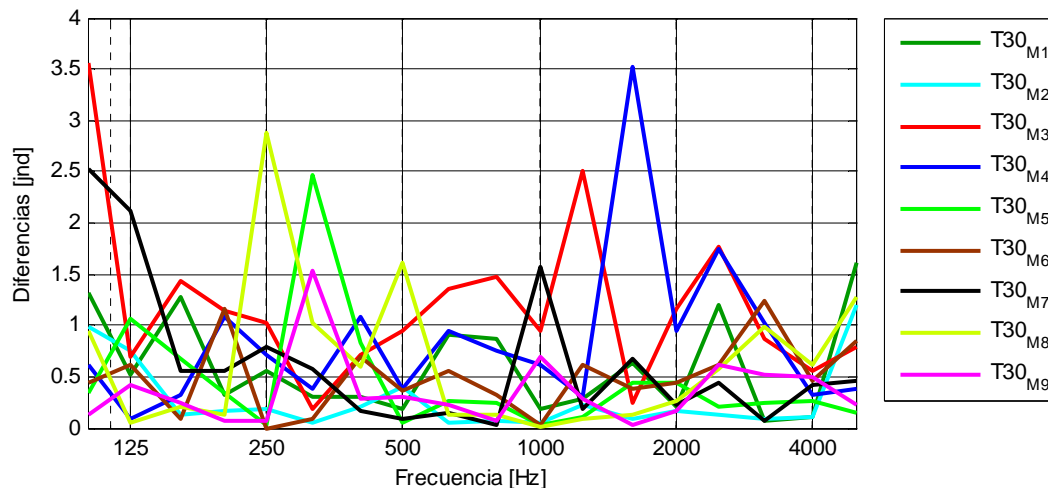


Figura 50. Diferencias entre los valores de T30 medidos para cada zona y tipo de señal (T30 barrido - T30 MLS)

El parámetro que mayores diferencias presenta es el tiempo de reverberación inicial, ya que únicamente no aparecen diferencias entre señales de excitación para los puntos centrales de la parte trasera de la sala (M5 y M7). El valor de JND es de nuevo del 5% lo que corresponde a 60 ms en baja frecuencia o 15 ms en frecuencias

medias. Presenta una diferencia especialmente alta para el punto M3 y la banda de frecuencia de 4000 Hz.

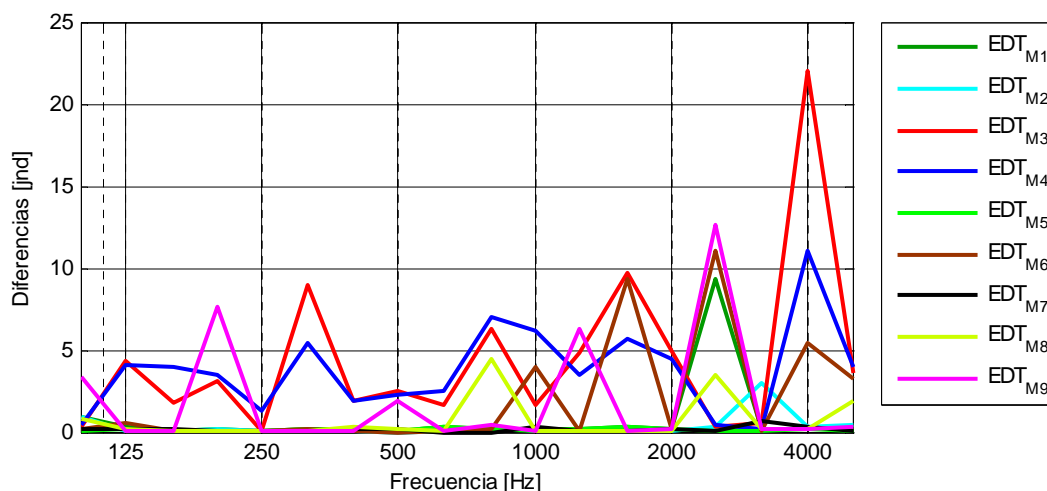


Figura 51. Diferencias entre EDT medido con MLS y con barrido

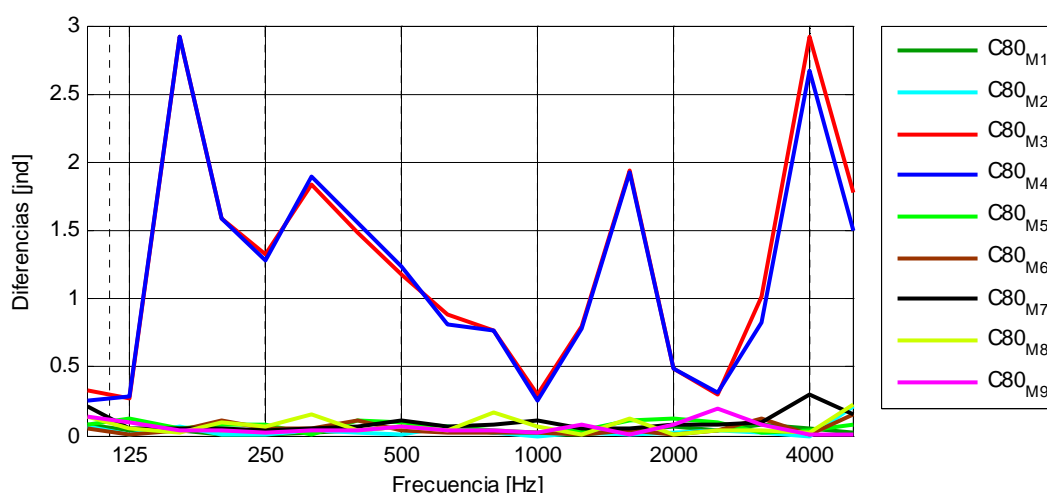


Figura 52. Diferencias en C80 entre las medidas de MLS y con barrido

En la Figura 52 y la Figura 53 se presentan las diferencias referenciadas al valor de JND que es 1 dB y 0,05 para Claridad y Definición respectivamente. Como se puede observar sólo existen diferencias perceptibles en los puntos M3 y M4 que corresponden a las zonas delantera e intermedia derecha de la sala mirando hacia la pantalla. D50 sólo tiene diferencias mayores de 1dB en las bandas de 160 Hz a 250 Hz con un pico en la banda de 200 Hz de 3,5 dB. En cuanto a C80, las bandas con diferencias son 9: de 160 Hz a 500 Hz, 1600 Hz, 4000 Hz y 5000 Hz. El resto de puntos presentan diferencias menores a 0,4 dB para la claridad y 0,02 para la definición.

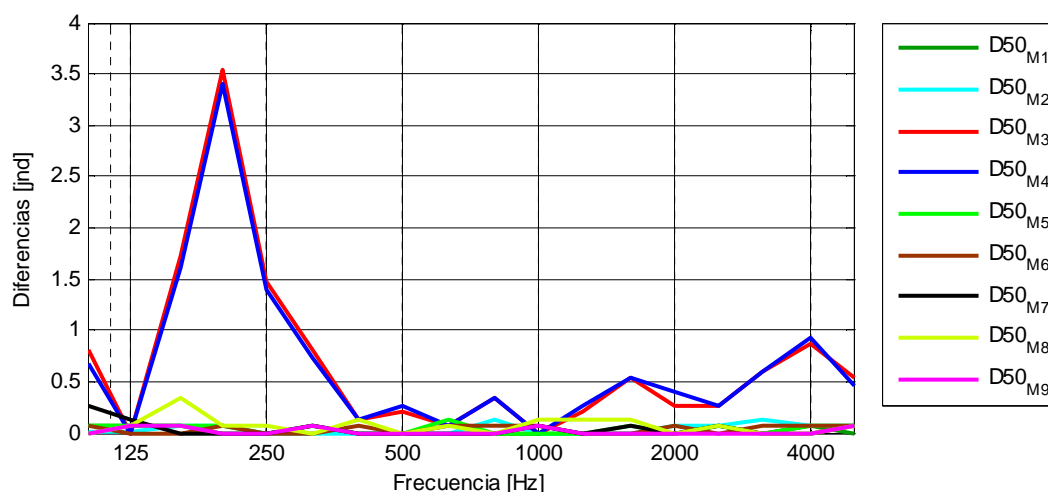


Figura 53. Diferencias en D50 medidos con MLS y barrido

Los resultados se repiten para el Tiempo Central, ya que los puntos más variables son M3 y M4 con pequeñas diferencias en 160 Hz y 200 Hz en torno a los 15 ms. La banda de 100Hz es la que muestra mayores diferencias llegando a los 21,1 ms en el punto M7.

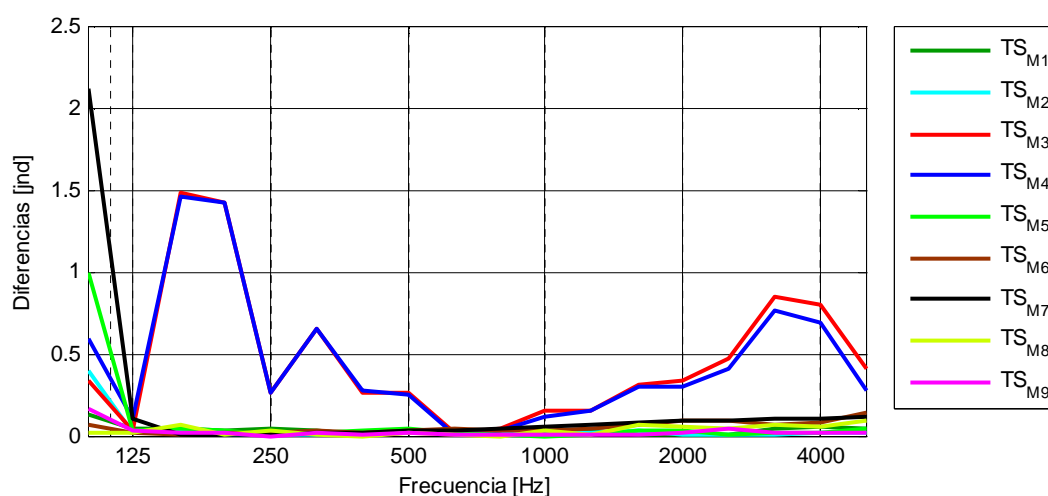


Figura 54. Diferencias en Ts entre valores medidos con MLS y con barrido

Por último, al comparar la Fracción de Energía Lateral medida con ambas señales se encuentran diferencias en los puntos M3, M4 y M8. Con lo que se repite las diferencias en los puntos del lateral derecho y se añade en el punto más alejado de las fuentes colocado en la esquina trasera izquierda.

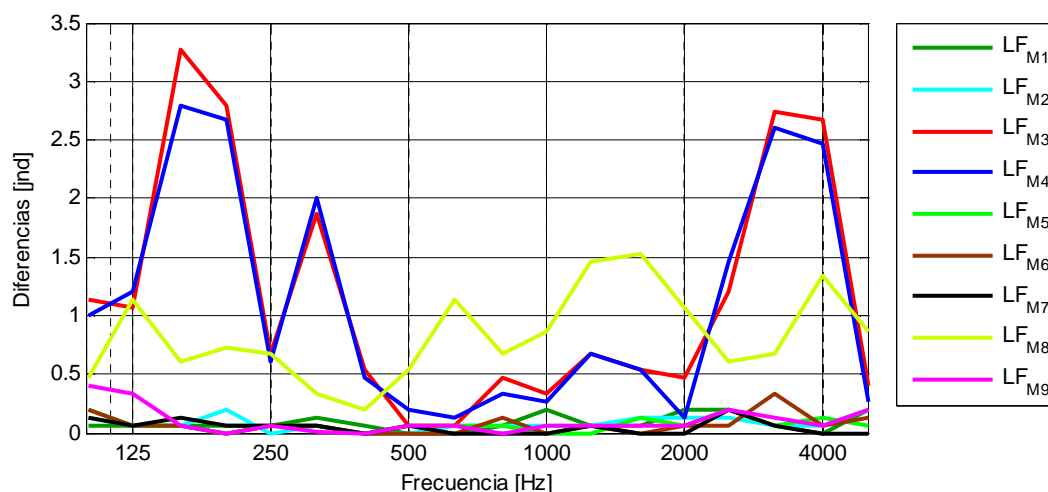


Figura 55. Diferencias en LF entre valores medidos con MLS y con barrido

Por lo tanto, se puede concluir que el tipo de señal utilizado no influye de una manera importante en el valor de los parámetros subjetivos de la sala, ya que no existen diferencias perceptibles en 7 de los 9 puntos para D50 y C80 y en 6 de los 9 puntos para LF y Ts. En el caso de la reverberación de la sala existen pequeñas diferencias en muchos de los puntos, pero esto puede ser debido a la eliminación de datos y que los valores bajos del tiempo de reverberación dejan unos márgenes de diferencias muy pequeños (entre 30 ms y 50 ms). Si que existe una influencia de las posiciones y la señal utilizadas ya que se repiten las posiciones con mayores diferencias.

Una vez comentadas las diferencias entre los datos obtenidos con ambas señales, se procede a incluir los datos zonales obtenidos con el barrido sinusoidal. Se ha optado por presentar los datos en promedios por sexteto de tercios de octavas en forma de tabla acompañados con la gráfica con todos los valores. Los valores promedios corresponden a las bandas de 100 Hz a 315 Hz para baja frecuencia, de 400 Hz a 1250 Hz para frecuencia media y de 1600 Hz a 5000 Hz para alta frecuencia.

Se comienza con los datos de T20 (ver la Tabla. XXVI y la Figura 56), los valores para cada grupo de bandas de frecuencia no presenta grandes diferencias, pero si llegan a ser diferencias perceptibles entre los valores máximos y mínimos. Todos los valores promedio se encuentran entre 0,55 s y 0,78 s siendo un poco menores en frecuencias medias, aunque al observar la gráfica se ven claramente valores mayores en baja frecuencia (hasta 1,1 s) y valores menores en torno a los 500 Hz (aproximadamente 0,45 s). Se presentan dos picos que llaman especialmente la atención por ser valores muy altos (0,84 s y 0,93 s) en la banda de 2000 Hz pertenecientes a los puntos de medida M7 y M8 que están el fondo de la sala.

T20 [s]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	0,711	0,559	0,654
M2	0,753	0,559	0,653
M3	0,693	0,567	0,691
M4	0,751	0,569	0,716
M5	0,758	0,627	0,664
M6	0,745	0,563	0,581
M7	0,780	0,569	0,652
M8	0,704	0,572	0,740
M9	0,786	0,609	0,681

Tabla. XXVI. T20 [s] por zonas medido con fuente omnidireccional

T30 [s]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	0,741	0,572	0,653
M2	0,737	0,598	0,686
M3	0,744	0,544	0,660
M4	0,760	0,620	0,673
M5	0,707	0,586	0,636
M6	0,755	0,582	0,617
M7	0,757	0,611	0,652
M8	0,702	0,625	0,694
M9	0,752	0,602	0,651

Tabla. XXVII. T30 [s] por zonas medido con fuente omnidireccional

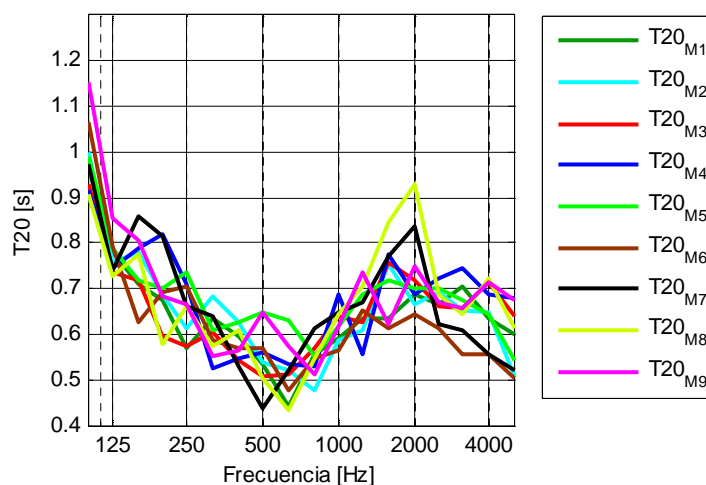


Figura 56. T20 [s] en función de la frecuencia y posición de micrófono

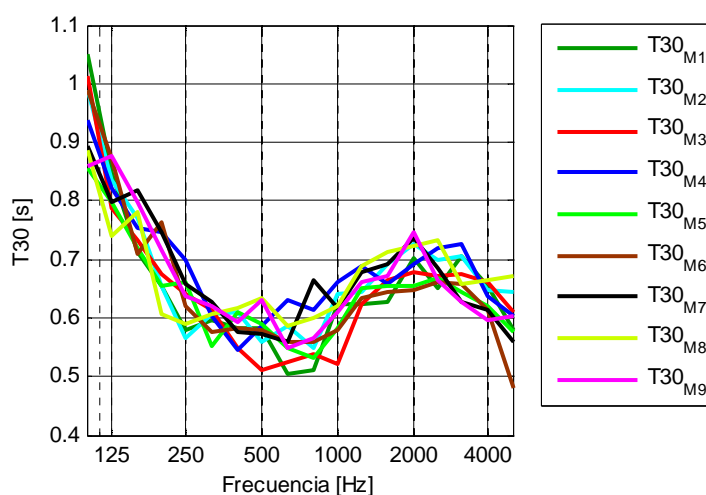


Figura 57. T30 [s] en función de la frecuencia y posición de micrófono

Como se ve en la Figura 57, los valores obtenidos para todas las posiciones son similares, pero hay una posición con una diferencia significativa en la banda de 5000 Hz por ser demasiado baja, en M6 el valor es cercano a 0,5 s. Los valores por zona de frecuencia son similares a los obtenidos para T20, pero las diferencias entre



las distintas posiciones son mucho menores como se veía en los valores de la desviación en el apartado anterior.

EDT [s]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	0,487	0,310	0,309
M2	0,747	0,466	0,598
M3	0,557	0,459	0,444
M4	0,640	0,457	0,478
M5	0,579	0,532	0,584
M6	0,639	0,490	0,436
M7	0,742	0,475	0,479
M8	0,690	0,473	0,575
M9	0,544	0,520	0,472

Tabla. XXVIII. EDT [s] por zonas medido con fuente omnidireccional

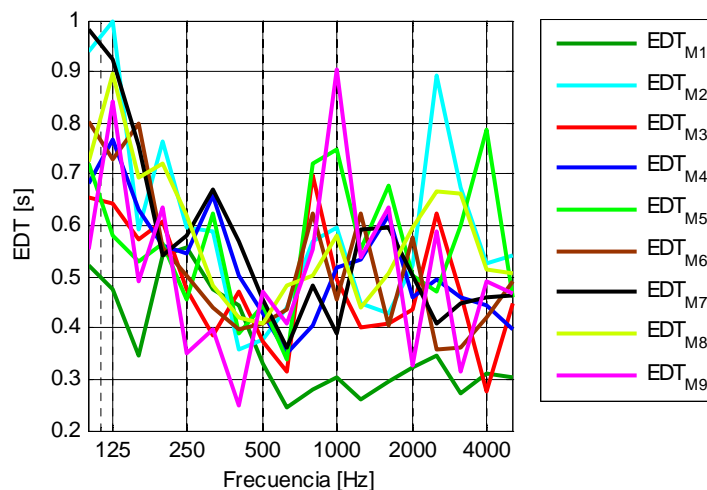


Figura 58. EDT [s] en función de la frecuencia y posición de micrófono

Los valores del Tiempo de Reverberación Inicial (EDT) se muestran en la Tabla. XXVIII y la Figura 58 son valores muy irregulares y con mucha dispersión. Se puede destacar los valores especialmente bajos en el punto M1 en casi todas las bandas que es uno de los puntos delanteros y los picos de 0,9 s en la banda de 1000 Hz para el punto M9 y 2500 Hz para el punto M2.

D50 y C80 tienen comportamientos parecidos. Los resultados presentan muchas variaciones en baja frecuencia con un aumento significativo al aumentar la frecuencia y a partir de 500 Hz se vuelven menos variables y dependientes de la posición. Si se presta atención a las bajas frecuencias de la Figura 60 aparecen valores de la Definición entre 0,2 y 0,9 dependiendo del punto de medida. Los promedios son mayores a 0,5 en frecuencia baja y 0,8 en frecuencia medias y altas. C80 toma valores positivos en todos los casos menos a la frecuencia de 125 Hz para el punto M7. Las diferencias máximas entre posiciones se encuentran entre 3 dB y 5 dB para las zonas de baja y alta frecuencia respectivamente.

C80 [dB]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	8,93	14,80	14,40
M2	6,65	15,10	15,75
M3	7,79	14,16	13,58
M4	7,59	13,74	11,39
M5	7,37	11,45	10,61
M6	5,70	13,99	12,85
M7	6,01	14,36	13,55
M8	5,71	14,45	13,37
M9	8,16	13,39	10,64

Tabla. XXIX. C80 [dB] por zonas medido con fuente omnidireccional

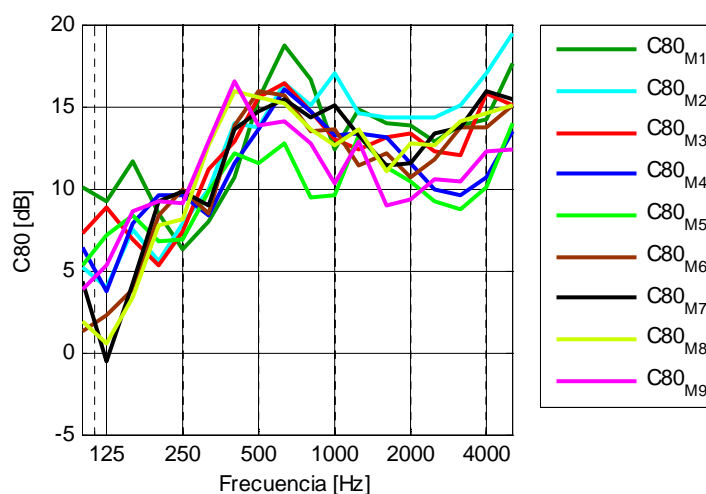


Figura 59. C80 [dB] en función de la frecuencia y posición de micrófono

D50 [-]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	0,72	0,92	0,92
M2	0,69	0,90	0,87
M3	0,66	0,91	0,92
M4	0,64	0,90	0,85
M5	0,60	0,88	0,86
M6	0,52	0,88	0,87
M7	0,59	0,88	0,87
M8	0,53	0,88	0,86
M9	0,68	0,91	0,85

Tabla. XXX. D50 [-] por zonas medido con fuente omnidireccional

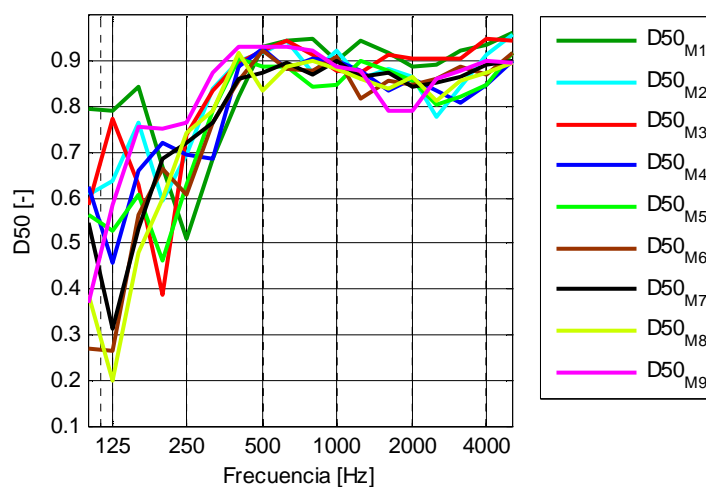


Figura 60. D50 [-] en función de la frecuencia y posición de micrófono

En la Figura 61, de nuevo se ven las grandes variaciones del parámetro en función de la posición, en este caso Ts, para baja frecuencia con valores entre 60 ms y 80 ms y la mayor estabilidad para media y alta con diferencias de 10 ms. Las menores diferencias entre posiciones se encuentran entre las bandas de 500 Hz y 1000 Hz donde todas las curvas tienen una caída similar.

TS [ms]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	60,9	22,2	21,4
M2	63,3	21,4	20,4
M3	67,9	22,0	17,6
M4	65,8	22,0	27,5
M5	69,1	24,3	26,0
M6	77,2	23,9	22,9
M7	74,0	22,8	24,5
M8	76,9	24,5	25,0
M9	66,3	20,2	27,6

Tabla. XXXI. Ts [ms] por zonas medido con fuente omnidireccional

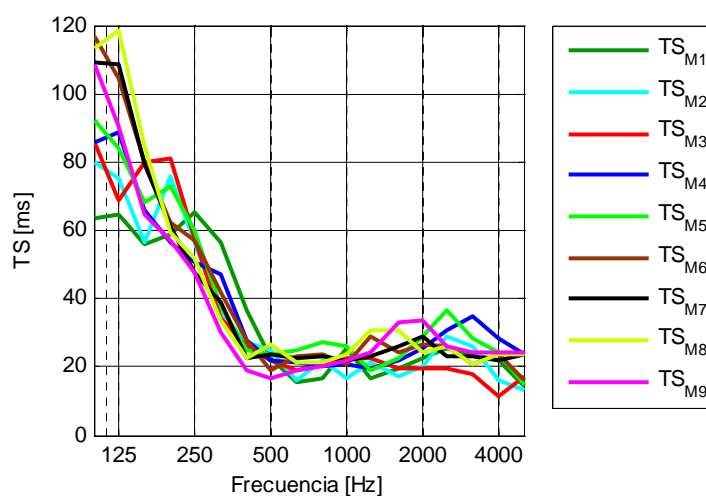


Figura 61. Ts [ms] en función de la frecuencia y posición de micrófono

Obviamente el parámetro con mayor variación entre posiciones de micrófono es el relativo a la Fracción de Energía Lateral, ya que está relacionado con la Anchura Aparente de la Fuente y no en todas las posiciones será la misma. Destaca en la Figura 62 un valor de aproximadamente 1 en la banda de 100 Hz para el punto M6 frente a valores menores en el resto de puntos (entre 0,2 y 0,6). Observando los valores promedios de la Tabla. XXXII las dos posiciones medidas de la zona central trasera (M5 y M7) tienen valores similares en todas las frecuencias.

De este análisis por posición de micrófono, se puede resaltar que se repiten los puntos con mayores diferencias entre uno u otro tipo de señal de excitación. Estos puntos (M3 y M4) se sitúan en la parte delantera e intermedia derecha de la sala.

En el análisis por parámetros, EDT y LF toman valores muy dispares, mientras que T30, D50 y Ts tienen valores muy próximos, por lo que no se puede resaltar ninguna posición que presente problemas sistemáticamente. Únicamente la posición M7 toma valores muy altos de T20 en frecuencias altas y un valor negativo de C80 para 125 Hz.

LF [-]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	0,54	0,40	0,58
M2	0,39	0,41	0,54
M3	0,37	0,37	0,34
M4	0,47	0,27	0,54
M5	0,41	0,24	0,30
M6	0,45	0,30	0,37
M7	0,44	0,24	0,32
M8	0,38	0,34	0,51
M9	0,51	0,28	0,44

Tabla. XXXII. LF [-] por zonas  
medido con fuente omnidireccional

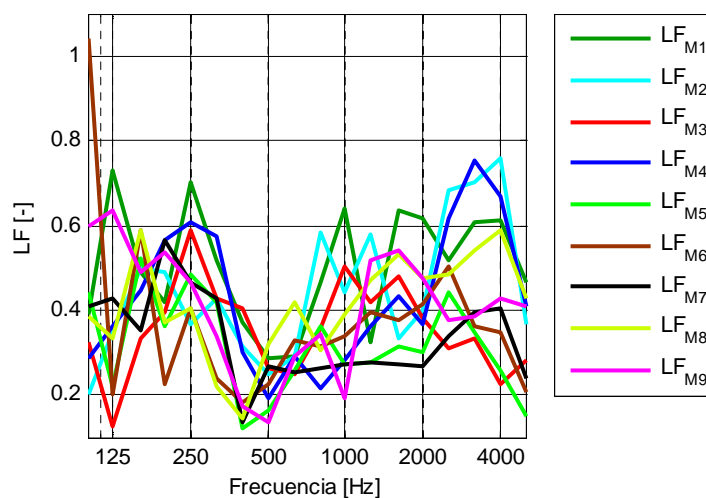


Figura 62. LF [-] en función de la frecuencia y  
posición de micrófono

### 6.1.6. Distribución en función de la distancia

No todos los parámetros presentan una dependencia respecto a la distancia por lo que se han ido analizando todos los casos en octava y tercio de octava y únicamente se incluyen los resultados con una tendencia evidente.

Los parámetros relativos a la reverberación, en general, no presentan ninguna tendencia clara a subir o bajar con la distancia. Si se puede ver una ligera subida de T20 en la banda de 2000 Hz y una pequeña bajada de T30 en la banda de 100 Hz como se muestra en la Figura 63. Los datos de EDT, como ya se ha comentado varias veces, presentan gran desviación y sin pendientes claras. Se podrían destacar los datos de la banda de 125 Hz, ya que presenta una parábola con una disminución desde los 10 m a los 20 m y a partir de ese punto sube de nuevo.

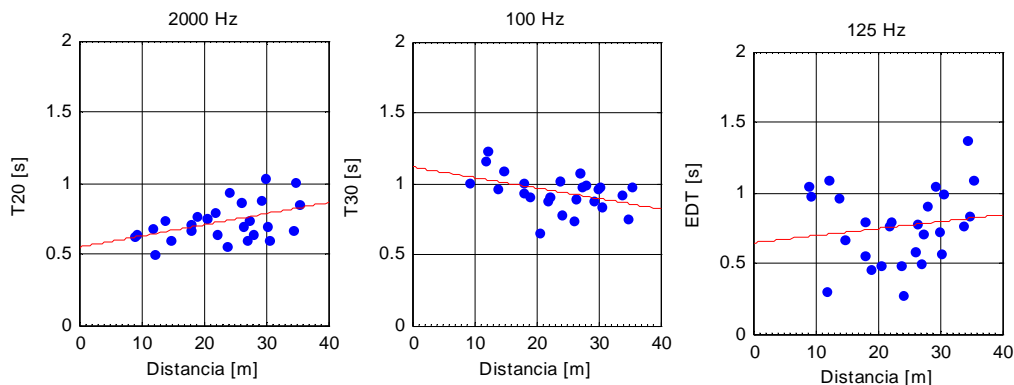


Figura 63. Distribución de T20, T30 y EDT en función de la distancia

Con los resultados obtenidos en media y alta frecuencia, la Definición no presenta ninguna variación en función de la distancia, pero en las bandas de baja frecuencia entre 100 Hz y 160 Hz tiende a disminuir con la distancia entre fuente y receptor como se observa en la Figura 64. Este resultado es especialmente significativo para la banda de 125 Hz ya que existe menos dispersión y los datos se colocan más claramente sobre la recta de caída.

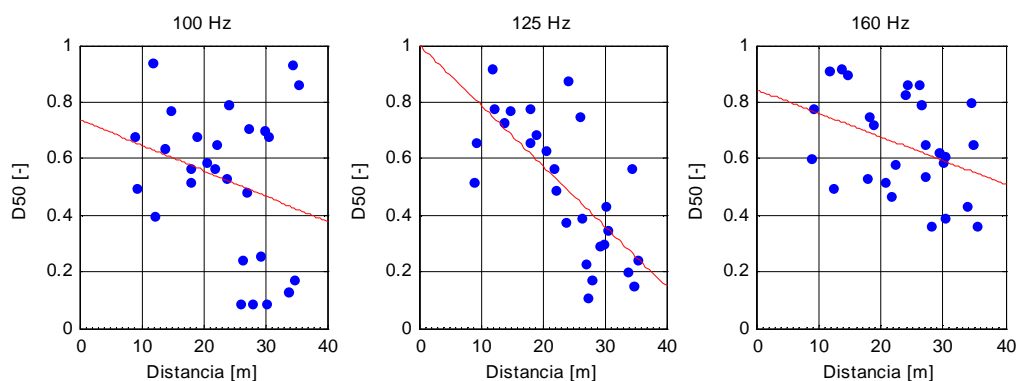


Figura 64. D50 [-] para baja frecuencia en función de la distancia

C80 presenta una tendencia de caída en las frecuencias de 100 Hz a 160 Hz pero con bastante dispersión de los resultados como se observa en la Figura 65.

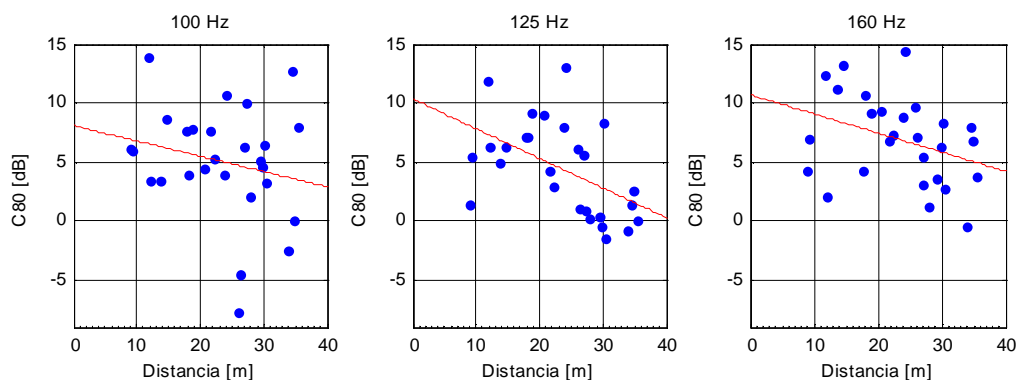


Figura 65. C80 [dB] para baja frecuencia en función de la distancia

Por último, para el Tiempo Central, si se percibe una tendencia de subida en la mayoría de las bandas, siendo especialmente marcada en las bandas de 100 Hz y 125 Hz (Figura 66) en baja frecuencia.

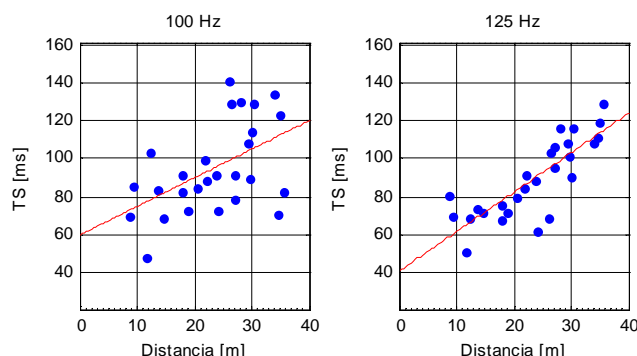


Figura 66. Ts para las bandas de 100 Hz y 125 Hz en función de la distancia entre fuente y receptor

El comportamiento de D50 y C80 parece similar ya que ambos presentan una disminución con la distancia para frecuencias bajas. Esta bajada se corresponde con un incremento de Ts para las mismas bandas, viendo con ellos la relación entre ambos parámetros.

### 6.1.7. Valores globales

En la Tabla. XXXIII se resumen los valores globales de la sala estudiada junto con el rango típico que indica la UNE-EN ISO 3382-1. El rango del tiempo de reverberación se ha tomado de la SMPTE EG 18-1994, que incluye una gráfica en la que se puede obtener el tiempo de reverberación óptimo para la banda de 500 Hz en salas de cine según su volumen como se explicaba en el apartado 2.3.3. La sala 6 cuenta con  $8.880 \text{ m}^3$  (aproximadamente  $314.000 \text{ ft}^3$ ) por lo que el rango óptimo será de 0,7 s a 1,1 s. Es una sala bastante seca con unos valores de reverberación por debajo de los recomendados, especialmente el EDT que el rango típico se encuentra entre 1,0 s y 3,0 s y se obtiene en este caso 0,490 s. Los parámetros de Claridad y Definición se encuentran muy por encima del rango, es una sala que presenta gran nitidez. En cuanto a la anchura aparente de la fuente que esta directamente relacionado con la Fracción Lateral de Energía, presenta más espaciosidad que la media de las salas medidas para obtener el rango típico. Como las salas de cine tienen un carácter especial y no son utilizadas de igual manera que las salas de conciertos o teatros, no se ajustan tan fácilmente a los valores típicos de ese tipo de sala.

	Valor	Desviación	Rango típico
$T20_{med}$ [s]	0,574	0,097	0,7 - 1,1*
$T30_{med}$ [s]	0,592	0,060	0,7 - 1,1*
$EDT_m$ [s]	0,465	0,192	1,0 s - 3,0 s
$C80_m$ [dB]	13,94	2,84	-5 dB - +5 dB
$D50_m$ [-]	0,90	0,06	0,3 - 0,7
$Ts_m$ [ms]	22,6	6,5	60 ms - 260 ms
$LF_m$ [-]	0,38	0,27	0,05 - 0,35

Tabla. XXXIII. Valores globales de la sala junto al rango típico para salas de conciertos o salas polivalentes vacías hasta 25 000 m<sup>3</sup>. \* Valor recomendado para la banda de 500 Hz según la SMPTE EG 18-1994

## 6.2. Sistema de refuerzo sonoro de la sala

En la segunda sesión de medición que tuvo lugar el 29 de mayo de 2014, la temperatura de la sala era de 21,2º y la humedad relativa del 32,4%.

### 6.2.1. Comprobación de la relación impulso-ruido

Al excitar la sala con el sistema de refuerzo sonoro, hubo problemas de ruido generado por el ordenador que se escuchaba especialmente cuando se utilizaban los sistemas de surround formados por 12 altavoces cada uno. Aun así se ha conseguido que aproximadamente la mitad de las medidas obtuvieran valores por encima de 45 dB de INR. En el caso de bandas de octava, de los 270 datos (5 posiciones de fuente por 9 posiciones de micrófono y por 6 bandas) 133 en las medidas de barrido y 137 en las de MLS superan los 45 dB y casi el 100% (269 y 265 para barrido y MLS respectivamente) superan los 35 dB. En la Tabla. XXXIV se muestran las combinaciones con valores inferiores a 35 dB que en la mayoría de los casos corresponden a la banda de 125 Hz.

	C - MLS	R- MLS	LS - MLS	RS - MLS	RS - Barrido
Micrófono / Frec.[Hz]	125	125	125	125	2000
4	34	40	40	48	48
6	37	35	37	34	46
7	42	33	37	37	52
8	35	35	43	32	44
9	37	38	32	37	30

Tabla. XXXIV. Valor de la relación impulso-ruido (INR) en las bandas de octava que presentan niveles inferiores a 35 dB

En tercios de octava los datos muestran resultados similares. Con la señal MLS no se llegan a los 45 dB en la banda de 100 Hz con ninguno de los altavoces y 28 de los 45 datos medidos no superan los 35dB. También presentan problemas la banda de 1000 Hz en las posiciones traseras (M8 y M9). En la Tabla. XXXV se presentan los datos para los altavoces de pantalla y en la Tabla. XXXVI para los altavoces de surround.

	C - MLS			L -MLS				R -MLS	
Micrófono / Frec.[Hz]	100	200	1000	100	125	200	1000	100	200
1	43	46	42	31	45	41	42	41	40
2	43	32	39	35	43	38	40	42	38
3	39	43	42	43	48	40	45	40	41
4	29	38	44	30	47	48	41	37	38
5	29	34	43	31	42	34	38	41	34
6	32	38	42	25	37	37	39	28	37
7	43	43	42	34	37	35	40	27	34
8	30	38	39	32	34	37	31	42	38
9	30	37	34	34	42	40	38	32	38

Tabla. XXXV. Valor de la relación impulso-ruido en las bandas de tercio de octava para la señal MLS y los altavoces de pantalla que presentan niveles inferiores a 35 dB



Micrófono / Frec.[Hz]	LS - MLS		RS -MLS					
	100	125	100	125	200	250	800	1000
1	41	45	44	46	40	44	47	49
2	34	38	28	38	30	36	41	37
3	32	41	37	43	50	44	48	45
4	32	40	31	49	44	49	50	45
5	32	40	32	44	39	41	45	37
6	29	44	29	38	38	39	37	40
7	27	39	31	38	38	37	32	43
8	37	41	22	31	38	34	41	29
9	26	29	35	42	37	40	41	40

Tabla. XXXVI. Valor de la relación impulso-ruido en las bandas de tercio de octava para MLS y los altavoces de surround que presentan niveles inferiores a 35 dB

Trabajando con barrido sinusoidal, hay menor número de medidas con INR demasiado bajo como se ve en la Tabla. XXXVII. Para las posiciones delanteras de la sala (de M1 a M4 y M6) el valor de INR es mayor a 35 dB en todas las bandas y para el punto central (M5) sólo es inferior a 35 dB para la banda de 100 Hz y el altavoz izquierdo. Las posiciones más problemáticas son las traseras, especialmente la M8 que corresponde a la esquina de la sala.

Micrófono / Frec.[Hz]	L - Barrido	R - Barrido	LS- Barrido		RS - Barrido				
	100	3150	100	125	100	500	630	1000	1250
5	33	44	43	47	36	47	40	37	46
7	38	33	38	43	45	45	27	43	45
8	32	39	40	42	26	34	38	33	33
9	45	43	30	31	43	35	43	37	44

Tabla. XXXVII. Valor de la relación impulso-ruido en las bandas de tercio de octava para la señal de barrido sinusoidal que presentan niveles inferiores a 35 dB

Tanto en octava como en tercio de octava se han obtenidos niveles superiores de INR para las respuestas recogidas con barrido sinusoidal, siendo especialmente problemática la banda de 100 Hz y los puntos más alejados de la pantalla.

### 6.2.2. Diferencias en T20, T30 y EDT promedio de la sala aplicando o no el Criterio de Chauvenet

Tras realizar los cálculos de los datos promedio de la sala aplicando o no el Criterio de Chauvenet las diferencias obtenidas son mayores de 1 JND para la mayoría de los casos. Tomando los datos en octavas, no hay diferencias en T30 ni utilizando señal MLS ni utilizando Barrido, esto nos indica que los datos obtenidos no tenían apenas valores extraños. En el caso de T20, las diferencias se presentan a partir de los 2000 Hz. Para las medidas con señal MLS las diferencias superan los 2,5 JND (85 ms) y para el barrido son inferiores a 2,7 (92 ms). Las diferencias en la señal de EDT son mucho mayores si se miden en JND, ya que el valor de EDT promedio obtenido es muy bajo y por lo tanto el valor de JND se encuentra entre 34 ms para baja frecuencias y 11 ms para frecuencias medias y altas. Se encuentran por lo tanto diferencias entre 25 ms y 80 ms.

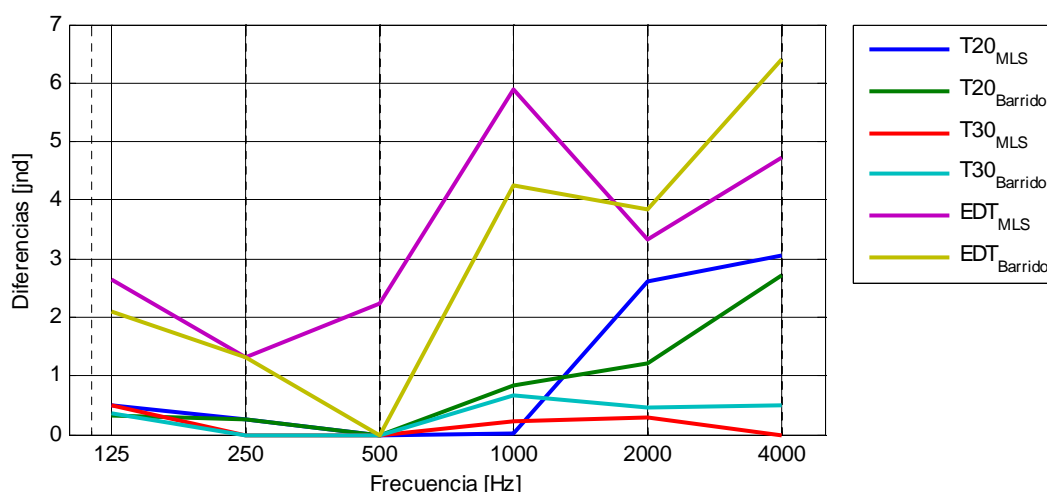


Figura 67. Diferencias entre los tiempos de reverberación medios promediando todas las fuentes utilizando o no el criterio de Chauvenet

En la Figura 68 se observan las diferencias en caso de trabajar en tercios de octava. De nuevo el parámetro con menores diferencias, y por tanto el que menor número de valores extraños tiene, es T30. Sólo supera el valor de JND en tres ocasiones, para las bandas de 100 Hz (44 ms) y 500 Hz (29 ms) para la señal MLS y en la banda de 3150 Hz (35 ms) para el barrido. Las diferencias en T20 se ven claramente a partir de los 2000 Hz con valores entre 41 ms y 117 ms (58 ms y 134 ms) para barrido sinusoidal (para señal MLS). EDT de nuevo es el caso con diferencias en casi todas las bandas, únicamente no hay diferencias perceptibles en las bandas de

100 Hz y 2500 Hz. Las diferencias máximas están en torno a 10 (116 ms) para la señal de barrido y 14 (114 ms) para la señal MLS.

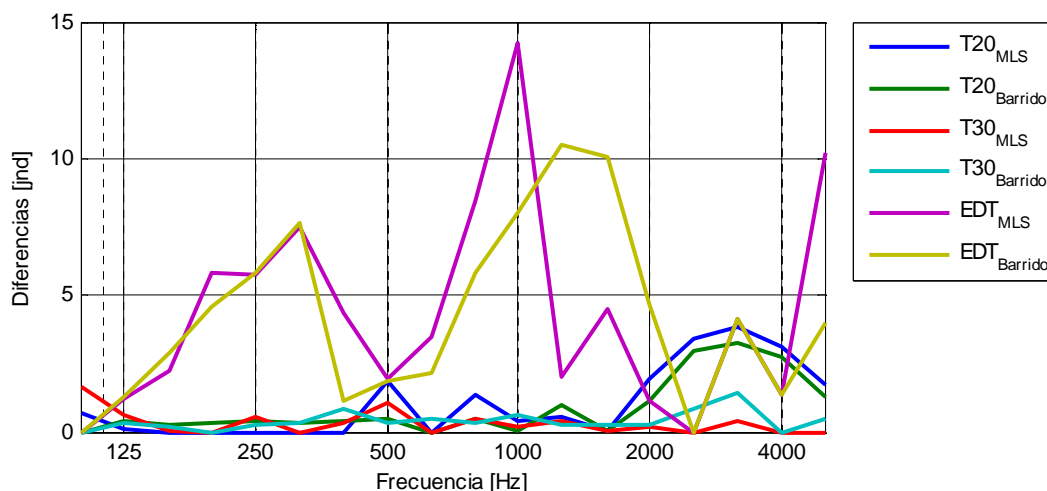


Figura 68. Diferencias entre los tiempos de reverberación medios en tercios de octava promediando todas las fuentes utilizando o no el criterio de Chauvenet

Con el sistema de refuerzo sonoro no se ha aplicado el Criterio de Chauvenet hasta converger, ya que se obtienen valores muy distintos para los canales de pantalla y surround, sino que se han realizado tres iteraciones como con la fuente omnidireccional. Se han eliminado mayor número de valores para la señal MLS que para el barrido sinusoidal, pero los resultados en ambos casos son similares.

### 6.2.3. Promedios de la sala

Para comenzar se comparan los valores promedios de la sala obtenidos con señal MLS y con barrido sinusoidal (ver Figura 69). Para los parámetros subjetivos C80, D50 y LF no hay diferencias perceptibles entre el uso de uno u otro tipo de señal en función del valor de JND para cada banda y para Ts sólo hay diferencia en 100 Hz de 2,92 JND (16,6 ms). En cuanto a los tiempos de reverberación, T20 sólo presenta diferencias en las bandas de 800 Hz a 1250 Hz estando entre los 33 ms y los 74 ms. T30 presenta diferencia en mayor número de bandas y todas ellas inferiores a 82 ms. Por último, EDT presenta aparentemente diferencias muy grandes y perceptibles, pero hay que tener en cuenta que el valor de un JND es aproximadamente 10 ms.

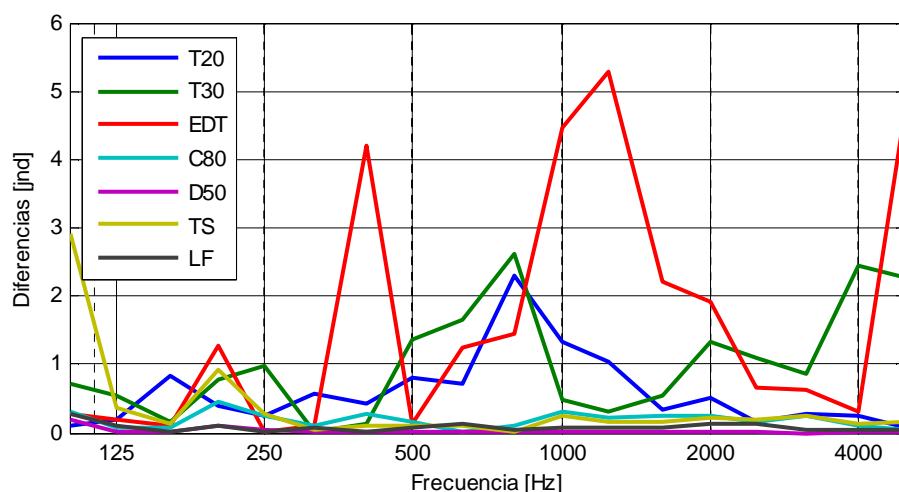


Figura 69. Diferencia entre los promedios de los distintos medidos con señal MLS o con barrido sinusoidal

En la Tabla. XXXVIII se muestran los datos de reverberación (T20, T30 y EDT) obtenidos utilizando como señal de excitación el barrido sinusoidal. T20 y T30 presenta valores similares para todas las bandas de frecuencias pero las desviaciones del segundo son menores como se muestra en la Figura 70. Además, las desviaciones para señal de barrido son menores que para MLS. La reverberación percibida (EDT) es mucho menor a la reverberación de la sala excepto para la banda de 100 Hz que toma valores similares. A partir de 250 Hz, EDT presenta valores inferiores a 0,4 s con desviaciones comparables al valor promedio (ver Figura 71). Los oyentes tendrán la sensación de que la sala apenas presenta reverberación, aunque la reverberación real sea un poco mayor.

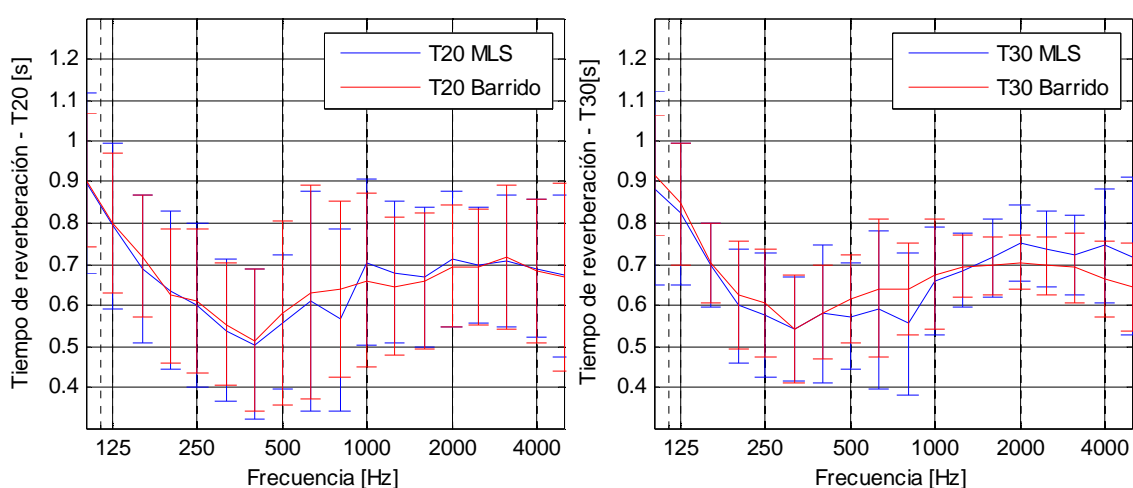


Figura 70. Tiempo de reverberación promedio de la sala medido con el sistema de refuerzo sonoro

Frec.[Hz]	T20 [s]	$\sigma_{T20}$	T30 [s]	$\sigma_{T30}$	EDT [s]	$\sigma_{EDT}$
100	0,904	0,163	0,917	0,147	0,907	0,347
125	0,801	0,171	0,846	0,149	0,669	0,308
160	0,719	0,150	0,703	0,097	0,639	0,292
200	0,623	0,163	0,624	0,130	0,469	0,323
250	0,609	0,177	0,605	0,131	0,350	0,278
315	0,553	0,150	0,540	0,131	0,166	0,126
400	0,514	0,173	0,583	0,113	0,224	0,205
500	0,582	0,224	0,614	0,108	0,232	0,161
630	0,632	0,263	0,641	0,167	0,273	0,207
800	0,638	0,215	0,639	0,112	0,212	0,147
1000	0,661	0,212	0,675	0,134	0,206	0,173
1250	0,645	0,167	0,694	0,076	0,214	0,164
1600	0,658	0,167	0,696	0,070	0,238	0,182
2000	0,694	0,148	0,704	0,067	0,322	0,252
2500	0,691	0,141	0,697	0,071	0,379	0,311
3150	0,715	0,176	0,691	0,084	0,285	0,255
4000	0,682	0,176	0,663	0,091	0,334	0,306
5000	0,668	0,229	0,645	0,107	0,340	0,333

Tabla. XXXVIII. Valores de T20, T30 y EDT promedio de la sala medidos con barrido sinusoidal y el sistema de refuerzo sonoro

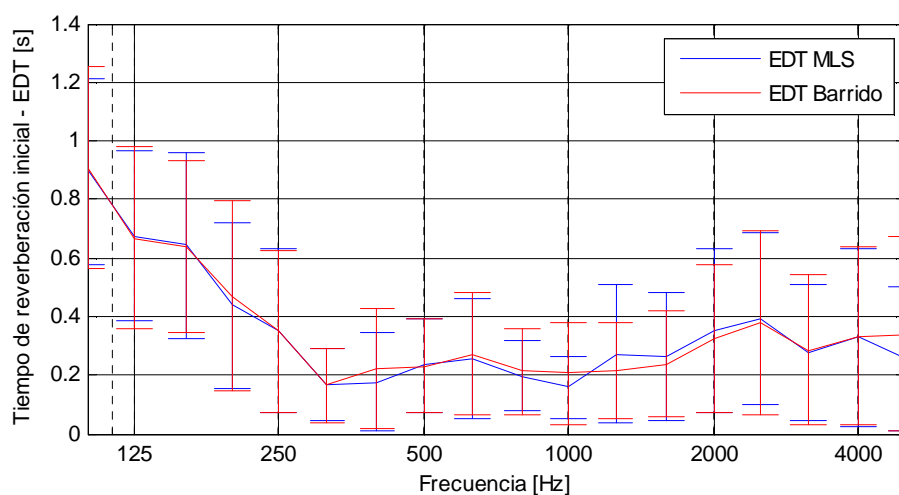


Figura 71. Tiempo de reverberación Inicial – EDT promedio medido con el sistema de refuerzo sonoro

Esta sala presenta unos valores de claridad y definición muy altos para todas las frecuencias lo que conlleva una inteligibilidad muy elevada. D50 es mayor a 0,49 en todas las bandas y 0,85 a partir de 250 Hz como se muestra en la Tabla. XXXIX. Las desviaciones disminuyen al aumentar la frecuencia. En cuanto a C80, los valores son superiores a 10 dB a partir de los 200 Hz con desviaciones entre 3 dB y 5 dB. La desviación para la banda de 100 Hz es superior al valor promedio, lo que indica el nivel de dispersión en esa banda. En la Figura 72 se ve como aumentan ambos parámetros hasta los 315 Hz y como se mantiene constante en frecuencias medias y altas.

Frec.[Hz]	C80 [dB]	$\sigma_{C80}$	D50 [-]	$\sigma_{D50}$	TS [ms]	$\sigma_{TS}$	LF [-]	$\sigma_{LF}$
100	3,10	4,01	0,49	0,21	113,9	29,6	0,60	0,67
125	6,27	5,13	0,60	0,22	87,6	26,2	0,42	0,39
160	8,06	4,49	0,72	0,16	72,7	21,4	0,47	0,28
200	10,39	5,31	0,79	0,20	58,3	24,3	0,52	0,56
250	13,01	5,32	0,85	0,16	44,0	21,6	0,44	0,43
315	15,24	4,19	0,90	0,15	37,5	18,4	0,45	0,64
400	16,31	4,30	0,91	0,13	35,2	21,7	0,46	0,71
500	15,18	3,50	0,92	0,12	33,5	15,9	0,47	0,61
630	15,39	3,61	0,91	0,11	32,8	19,3	0,55	0,80
800	14,97	2,97	0,92	0,09	29,7	13,6	0,43	0,54
1000	14,42	3,25	0,91	0,10	31,6	17,8	0,44	0,59
1250	15,17	4,15	0,92	0,09	22,9	14,4	0,48	0,66
1600	15,32	4,21	0,91	0,09	21,3	14,8	0,53	0,83
2000	14,13	4,02	0,90	0,11	24,9	14,9	0,57	0,73
2500	13,81	3,67	0,89	0,12	22,7	11,8	0,58	0,67
3150	14,23	3,65	0,91	0,08	21,8	12,8	0,60	0,70
4000	14,40	3,88	0,91	0,10	20,6	15,2	0,61	0,77
5000	14,64	4,73	0,91	0,11	21,2	17,7	0,52	0,68

Tabla. XXXIX. Valores de C80, D50, Ts y LF promedio de la sala medidos con barrido sinusoidal y el sistema de refuerzo sonoro

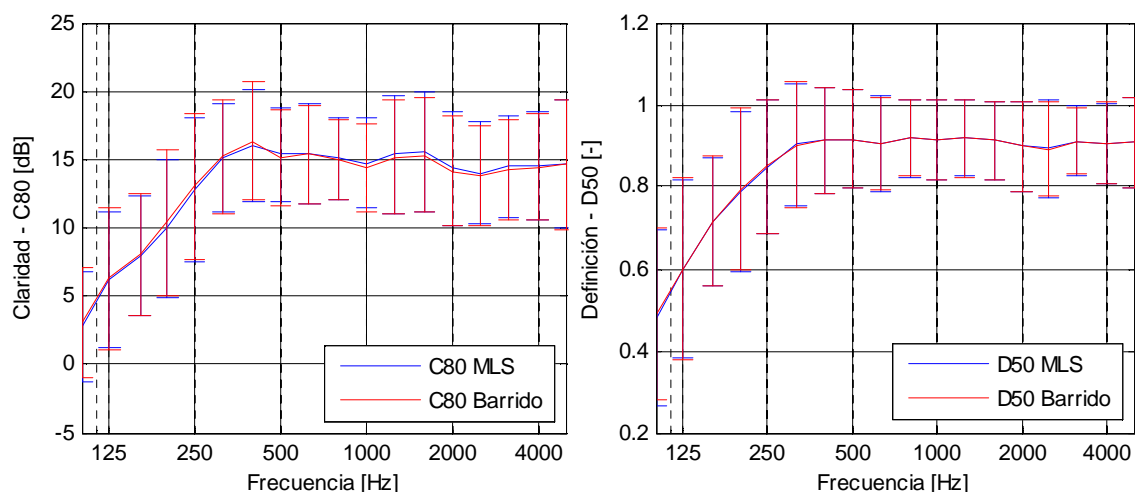


Figura 72. Claridad [dB] y Definición [-] promedio de la sala medido con el sistema de refuerzo sonoro

El tiempo central disminuye con la frecuencia y toma valores superiores a 50 ms en frecuencias bajas, entre 30 ms y 50 ms en frecuencias medias y entre 20 ms y 25 ms para frecuencias altas como se ve en la Figura 73. En cuanto a las desviaciones, en frecuencias altas son valores comparables al valor promedio (entre 10 ms y 20 ms). LF presenta valores en torno a 0,5 para todas las frecuencias con desviaciones superiores al valor promedio. Estos valores son razonables ya que al excitar la sala con los altavoces de surround gran parte de la energía es recibida por uno de los lóbulos del micrófono bidireccional pero al excitarlo con los altavoces de pantalla la mayor parte de la energía la recibe el omnidireccional dando valores muy distintos.

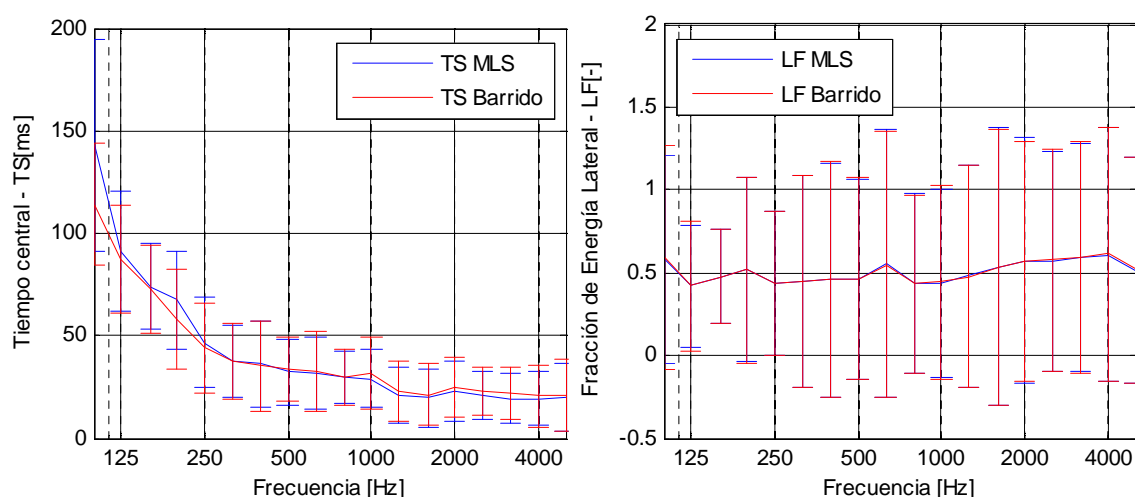


Figura 73. Tiempo Central [ms] y Fracción de Energía Lateral [-] promedio medido con el sistema de refuerzo sonoro

Como los resultados anteriores presentan desviaciones muy grandes, se han realizado los promedios de la sala agrupando por un lado los canales de pantalla y por otro los canales de surround. Los valores de T30 no muestran diferencias apreciables entre el promediado de todas las fuentes, los altavoces de pantalla o el sistema de surround y por lo tanto sólo se presentan los datos gráficamente en la Figura 74. Las diferencias mayores son de 100 ms entre los altavoces de pantalla y los de surround para las bandas de 125 Hz y 400 Hz. El resto de bandas tiene diferencias menores a 65 ms siendo la mitad de ellas menores a 20 ms. Si se comparan los valores de T20 las diferencias se encuentran entre 30 ms y 130 ms. Observando la Figura 74 se comprueba que las mayores diferencias se encuentran en media y alta frecuencia. Los valores de desviaciones son similares a los del promedio de la sala tanto para T20 como para T30.

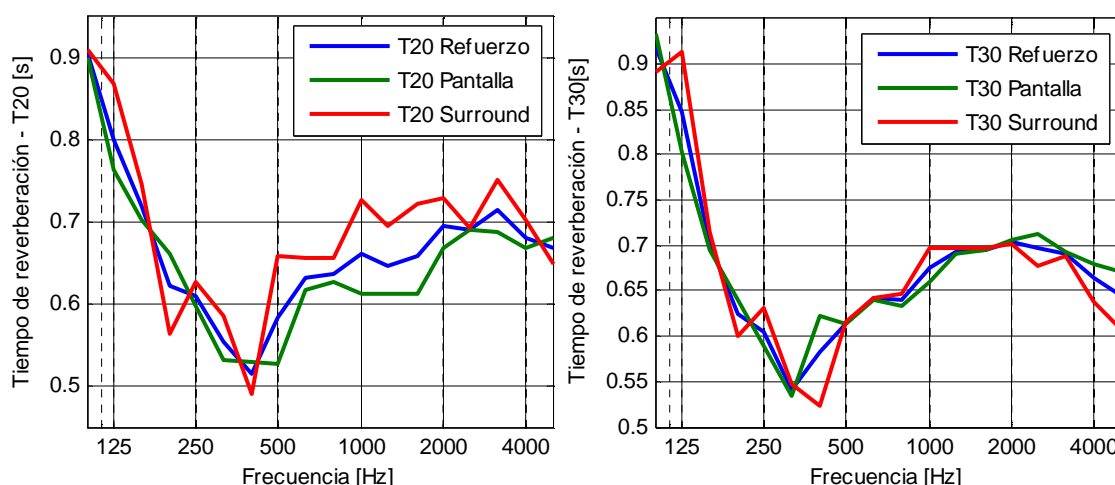


Figura 74. Tiempo de reverberación para distintas agrupaciones de fuentes

El tiempo de reverberación inicial es mayor para el conjunto de altavoces de surround con diferencias que alcanzan los 377 ms. En cambio, los altavoces de pantalla proporcionan menores valores EDT en torno a 0,2 s, menor sensación de reverberación. Las desviaciones se presentan en la Tabla. XL, como se puede apreciar son bastante altas en ambos casos y similares al valor promedio en medias y altas frecuencias.



	Pantalla		Surround	
Frec.[Hz]	EDT [s]	$\sigma_{EDT}$	EDT [s]	$\sigma_{EDT}$
100	0,804	0,256	1,063	0,411
125	0,677	0,288	0,657	0,347
160	0,622	0,231	0,670	0,385
200	0,385	0,244	0,622	0,396
250	0,272	0,209	0,485	0,335
315	0,099	0,070	0,295	0,108
400	0,127	0,140	0,379	0,200
500	0,209	0,161	0,266	0,160
630	0,210	0,153	0,360	0,243
800	0,191	0,151	0,249	0,138
1000	0,184	0,175	0,250	0,167
1250	0,192	0,176	0,257	0,133
1600	0,177	0,161	0,341	0,175
2000	0,271	0,245	0,405	0,247
2500	0,299	0,259	0,500	0,350
3150	0,214	0,218	0,401	0,274
4000	0,229	0,221	0,499	0,353
5000	0,200	0,219	0,577	0,364

Tabla. XL. Valores de EDT promedio para distintas combinaciones de altavoces

Como ya se ha comentado anteriormente la definición y la claridad de la sala toma valores muy altos especialmente a partir de los 250 Hz. Como se ve en la Figura 76 los altavoces que aportan esa nitidez en la sala son, en gran medida, los altavoces de pantalla. El valor de D50 toma valores superiores a 0,75 a partir de 160 Hz y superiores a 0,90 a partir de 250 Hz para estos altavoces. Además las desviaciones son pequeñas, menores a 0,1 a partir de 200 Hz. Con los altavoces de surround se obtienen valores menores que no superan 0,9 en ninguna de las bandas y las desviaciones superan 0,1 en todas ellas. Estos resultados se repitan para el caso de C80. Los valores de C80 para las altavoces de pantalla superan los 14 dB en 14 de los 18 bandas, mientras que los de los altavoces de surround sólo los superan en una banda. Las desviaciones, que se presentan en la Tabla. XLI, son menores a 4 dB para las altavoces de pantalla pero alcanzan los 7 dB para los de surround.

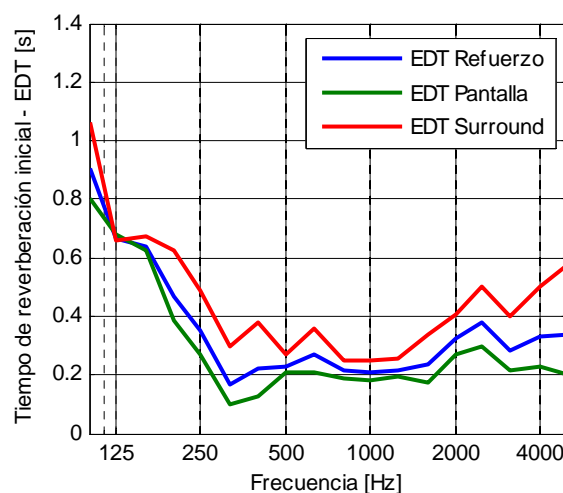


Figura 75. Tiempo de Reverberación Inicial [s] promedio para distintas agrupaciones de fuentes

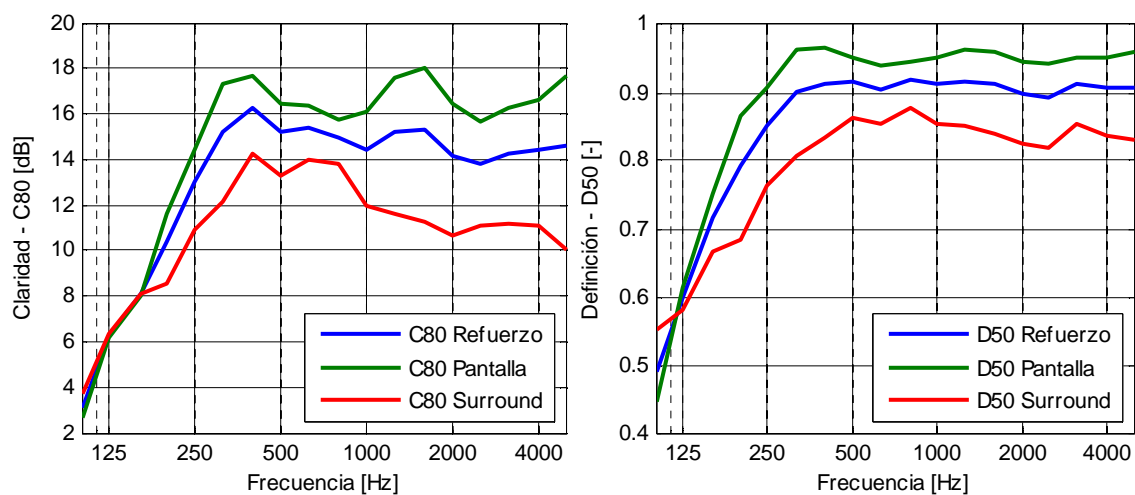


Figura 76. Claridad [dB] y Definición [-] promedio para distintas agrupaciones de fuentes

	Pantalla		Surround		Pantalla		Surround	
FREC.[Hz]	C80 [dB]	$\sigma_{C80}$	C80 [dB]	$\sigma_{C80}$	D50 [-]	$\sigma_{D50}$	D50 [-]	$\sigma_{D50}$
100	2,70	3,99	3,71	4,08	0,45	0,21	0,55	0,21
125	6,21	3,31	6,36	7,16	0,61	0,18	0,58	0,27
160	8,04	2,93	8,09	6,25	0,75	0,11	0,67	0,20
200	11,60	3,12	8,58	7,23	0,87	0,07	0,68	0,27
250	14,41	3,52	10,93	6,83	0,91	0,07	0,76	0,22
315	17,29	2,06	12,16	4,72	0,96	0,02	0,81	0,21
400	17,71	2,96	14,21	5,17	0,97	0,02	0,84	0,18
500	16,44	2,70	13,29	3,78	0,95	0,03	0,86	0,17
630	16,34	3,08	13,95	3,95	0,94	0,06	0,86	0,15
800	15,78	2,20	13,77	3,60	0,95	0,03	0,88	0,13
1000	16,06	1,88	11,97	3,35	0,95	0,03	0,85	0,13
1250	17,56	2,05	11,59	3,94	0,96	0,03	0,85	0,11
1600	18,05	1,81	11,23	3,36	0,96	0,03	0,84	0,11
2000	16,46	2,78	10,62	2,87	0,95	0,04	0,83	0,14
2500	15,63	2,43	11,07	3,53	0,94	0,04	0,82	0,15
3150	16,24	2,34	11,22	3,15	0,95	0,03	0,85	0,10
4000	16,61	2,28	11,08	3,41	0,95	0,03	0,84	0,13
5000	17,69	2,23	10,07	3,67	0,96	0,05	0,83	0,13

Tabla. XLI. Valores de C80 [dB] y D50 [-] para distintas combinaciones de altavoces

Para baja frecuencia los valores del Tiempo Central son similares para ambas combinaciones de altavoces, pero las diferencias aumentan con la frecuencia como se observa en la Figura 77. A partir de 200 Hz el sistema de surround proporciona mayores valores que no bajan de los 30 ms en ninguna banda, pero con desviaciones superiores a 10 ms. En alta frecuencia  $T_s$  llega a los 10 ms para las altavoces de pantalla con desviaciones en torno a los 5 ms.

Frec. [Hz]	Pantalla		Surround	
	$T_s$ [ms]	$\sigma_{Ts}$	$T_s$ [ms]	$\sigma_{Ts}$
100	113,0	22,2	115,2	39,0
125	85,3	15,1	91,2	37,5
160	71,0	18,4	75,3	25,6
200	50,1	11,3	70,6	32,7
250	37,5	10,0	53,7	29,8
315	33,0	16,3	44,2	19,8
400	32,4	22,5	39,3	20,4
500	29,8	14,2	39,1	16,9
630	29,9	18,4	37,2	20,4
800	26,6	10,8	34,3	16,1
1000	25,9	11,8	40,1	21,9
1250	15,4	4,6	34,1	16,8
1600	13,1	4,2	33,7	16,5
2000	17,7	9,1	35,6	15,5
2500	16,4	5,2	32,3	12,7
3150	15,0	5,7	32,1	13,7
4000	12,4	3,9	32,9	17,6
5000	11,6	4,7	35,6	20,4

Tabla. XLII. Valores de  $T_s$  [ms] para distintas combinaciones de altavoces

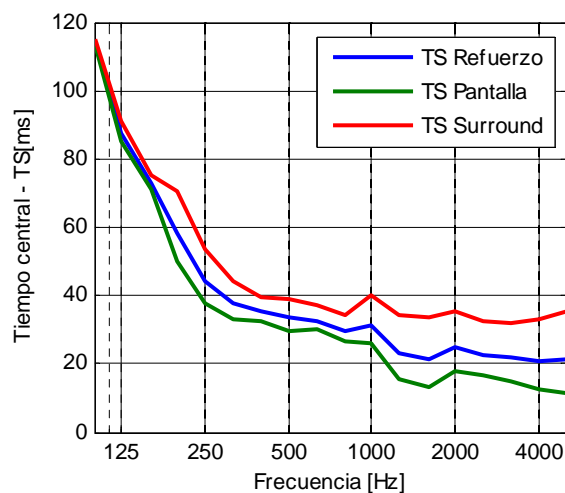


Figura 77.  $T_s$  [ms] promedio para distintas agrupaciones de fuentes

Los resultados obtenidos para LF son lógicos; los altavoces de surround dan valores superiores de LF (mayor anchura aparente) y los altavoces de pantalla valores más bajos. Los valores de LF superiores a 1 se deben a que en algunas de las

posiciones la energía recogida por el micrófono bidireccional es mayor que la recogida por el omnidireccional.

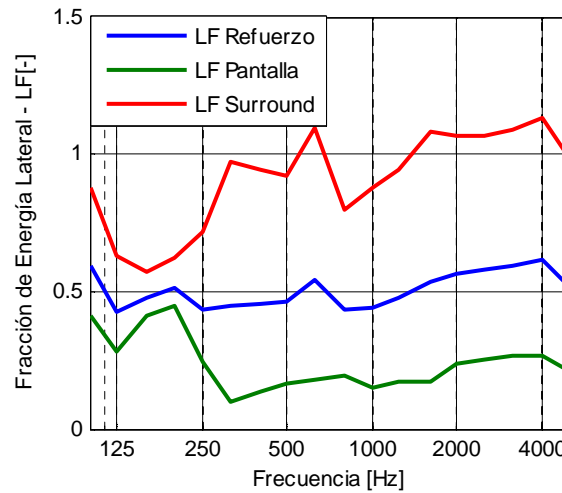


Figura 78. LF [-] promedio para distintas agrupaciones de fuentes

Como resumen a este apartado se puede comentar que no se han encontrado grandes diferencias entre ambos tipos de señal, aunque las desviaciones en el caso de MLS son un poco mayores, lo cual puede deberse a la eliminación de datos por el Criterio de Chauvenet. Por otro lado, la realización del promedio de todos los canales ha resultado errónea, ya que existen grandes diferencias entre los altavoces de pantalla y surround que provocaba unos valores de desviación excesivamente altos. Por lo tanto se considera más adecuado promediar los canales de pantalla separadamente a los de surround. Con esta idea, se han obtenido unos valores de T30 muy similares en ambos casos, pero EDT mucho menor con los altavoces de pantalla (en torno a 0,2 s). La sala presenta gran claridad y definición, más altas con los altavoces de pantalla, y un tiempo central bastante bajo, lo cual ayudará a que la inteligibilidad de la sala sea muy buena.

#### 6.2.4. Promedios por posición de fuente

Realizando el promediado de los datos por posición de fuente, se observa que para T30 no existen diferencias considerables entre una y otra fuente pero para T20 y el altavoz central (C) los valores a partir de 500 Hz son menores que para el resto de fuentes. Además, para el conjunto de surround derecho (RS) cae T20 en 5000 Hz, coincidiendo con el valor obtenido con el altavoz central (0,55 s).

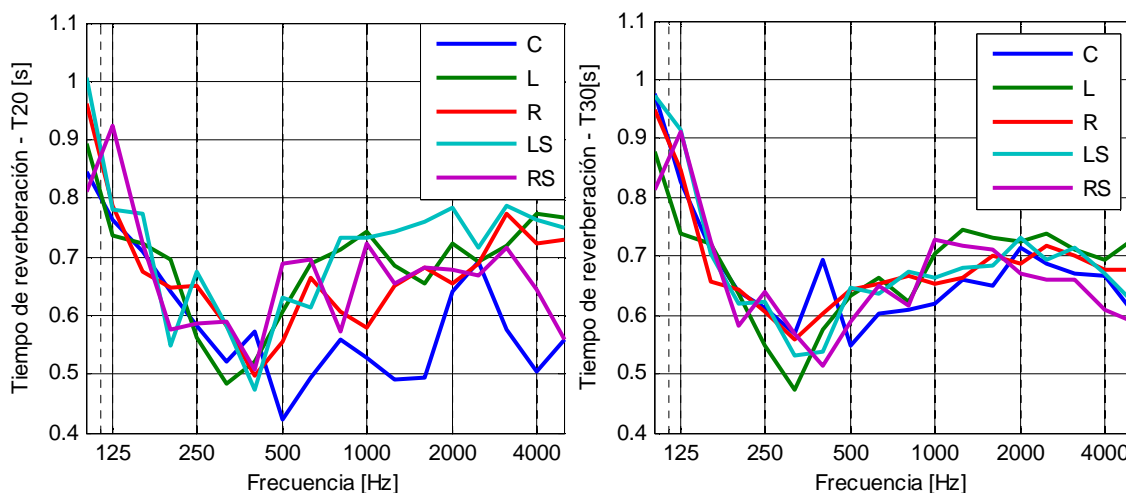


Figura 79. Tiempo de reverberación promedio por posición de fuente

En la Figura 80 y la Figura 81, se observa que para el conjunto de altavoces de surround derecho EDT es mayor que para el resto de altavoces y C80 y D50 es menor. Esto conlleva que la reverberación percibida sea más alta y la nitidez de la sala más baja. No aparecen diferencias en cuanto a D50 en el resto de altavoces, todos ellos tienen un comportamiento similar. Aunque si se encuentran diferencias en otros parámetros como C80 con una disminución a partir de 1000 Hz con el conjunto de altavoces de surround izquierdo (LS) o en EDT con valores inferiores con el altavoz izquierdo (L).

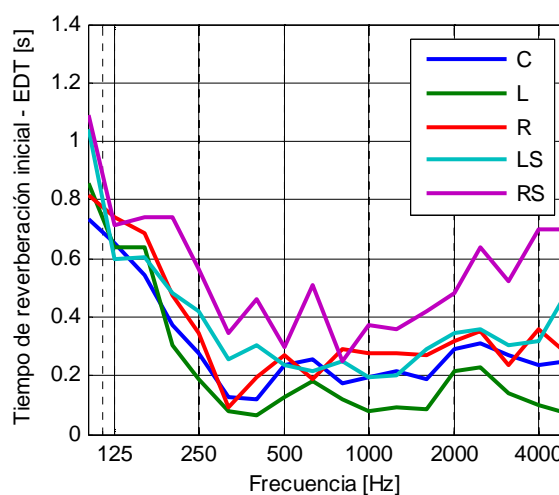


Figura 80. EDT promedio por posición de fuente

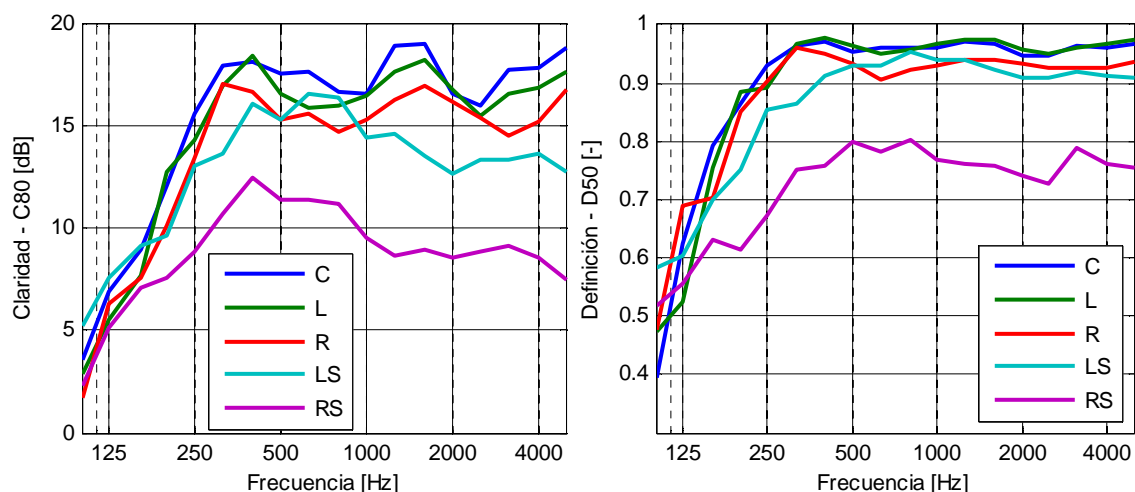


Figura 81. Claridad y Definición por posición de fuente

Los tres altavoces de pantalla presentan igual comportamiento para Ts y LF como se muestra en la Figura 82. De nuevo, el sistema de surround da resultados muy diferentes especialmente el derecho con valores más altos tanto de Ts como de LF. En cambio el surround izquierdo los valores de Ts son parecidos a los de los altavoces de pantalla, un poco superiores, y los de de LF son intermedios entre los de pantalla y el surround derecho.

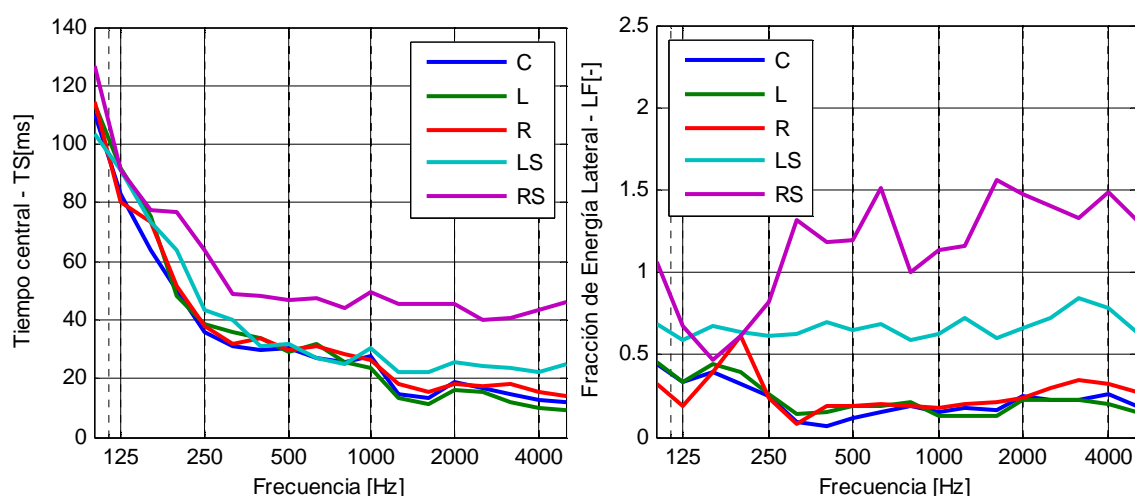


Figura 82. TS y LF promedio por posición de fuente

Este análisis marca la clara diferencia entre los valores obtenidos para el canal de surround derecho y el izquierdo en todos los parámetros subjetivos.

## 6.2.5. Promedios por zonas

En la comparación de las señales de excitación punto a punto, los parámetros relativos a la reverberación presentan diferencias apreciables en todos los puntos,

excepto para T20 y la posición M3. Para T20 la diferencias más amplia se presenta en el punto M8 para la frecuencia de 1000 Hz con aproximadamente 0,30 s como se observa en la Figura 83, en el resto de puntos las diferencias no superan los 0,15 s, la cual está dentro de un margen razonable ya que es comparable a la desviación estándar de los promedios. Lo mismo ocurre con T30, presenta diferencias en todos los puntos, desplazándose la máxima diferencia a la banda de 400 Hz del mismo punto.

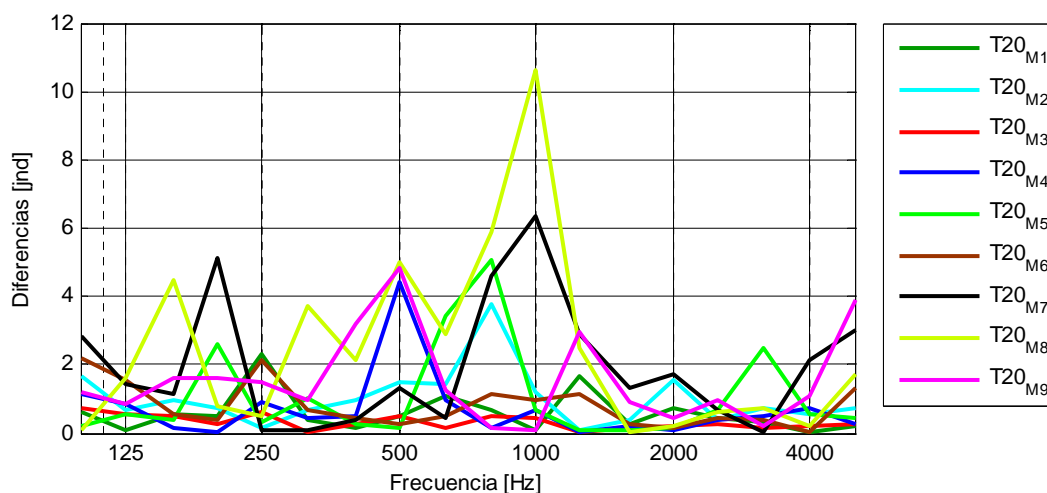


Figura 83. Diferencias entre los valores de T20 medidos para cada zona y tipo de señal (T20 barrido - T20 MLS)

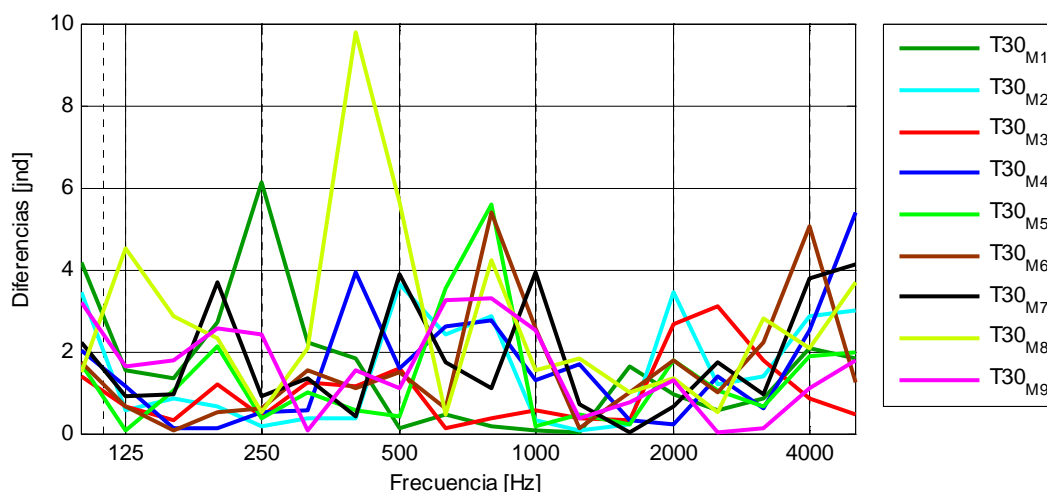


Figura 84. Diferencias entre los valores de T30 medidos para cada zona y tipo de señal (T30 barrido - T30 MLS)

Como EDT toma valores muy bajos, el margen de diferencias apreciables es muy pequeño entre 10 ms en alta frecuencia y 45 ms en baja. Por lo que aparecen

valores en JND muy altos, esto puede deberse también a la gran dispersión de los datos obtenidos.

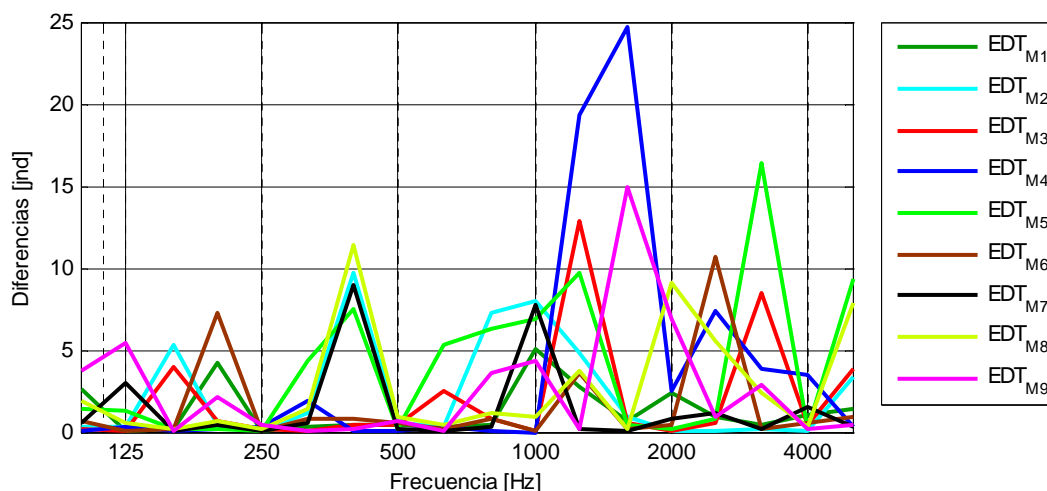


Figura 85. Diferencias entre los valores de EDT medidos para cada zona y tipo de señal (EDT barrido - EDT MLS)

En las siguientes figuras (Figura 86, Figura 87 y Figura 88) se muestran los parámetros subjetivos cuyas diferencias entre señales de excitación son mucho menores. D50 no presenta diferencias apreciables para ningún punto, son todas menores de 0,5 y por ello no se presenta gráficamente los resultados. La claridad tampoco presenta grandes diferencias, se limitan a la banda de 1000 Hz del punto M8 (menos de 2 dB) y las bandas de 250 Hz y 315 Hz del punto M9 (1,1dB). Estos puntos son los más retrasados de la sala y los más problemáticos a la hora de captar la respuesta impulsiva. El punto M8 también presenta diferencias en LF (en la banda de 100 Hz) y TS (en la banda de 100 Hz y 1000 Hz). El tiempo central también presenta diferencias en la banda de 100 Hz para el resto de puntos y la banda de 200 Hz para las posiciones M2, M5 y M7.

Debido a la dispersión de los datos y las pequeñas diferencias existentes, se podría indicar que ambas señales de excitación dan resultados similares, especialmente para los parámetros subjetivos. En caso del tiempo de reverberación, la relación impulso-ruido era demasiado baja y en algunos puntos las reflexiones y/o señales de otros altavoces (para el sistema de surround) hacen difícil la obtención de una respuesta al impulso adecuada.



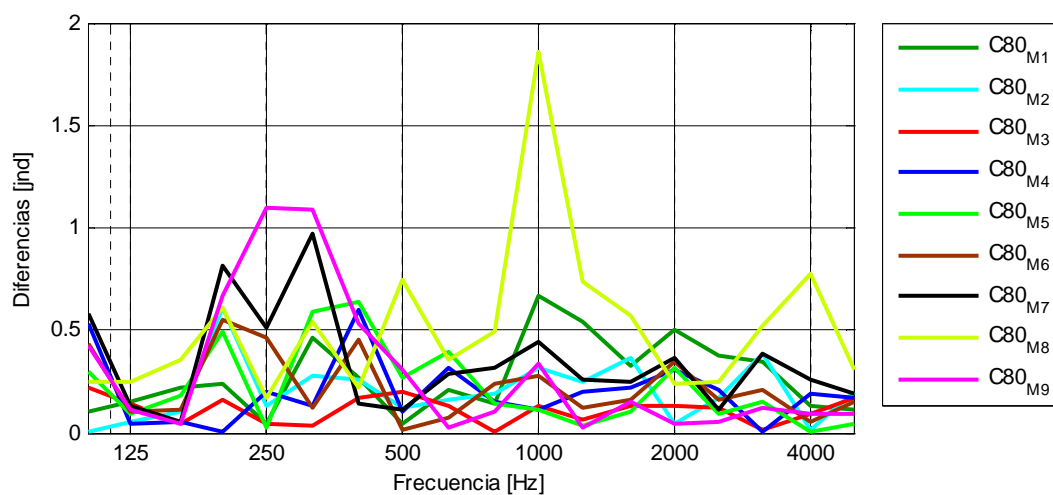


Figura 86. Diferencias entre los valores de C80 medidos para cada zona y tipo de señal (C80 barrido – C80 MLS)

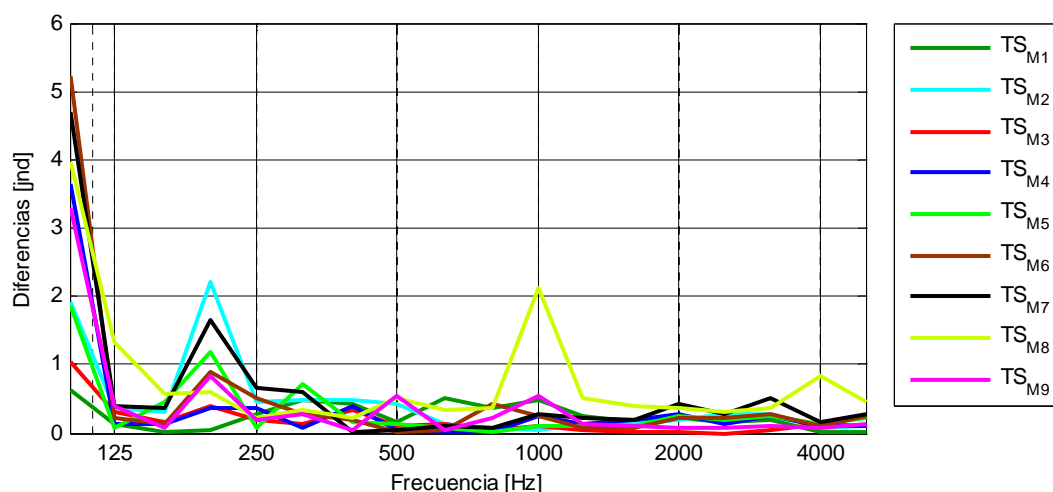


Figura 87. Diferencias entre los valores de TS medidos para cada zona y tipo de señal (TS barrido – TS MLS)

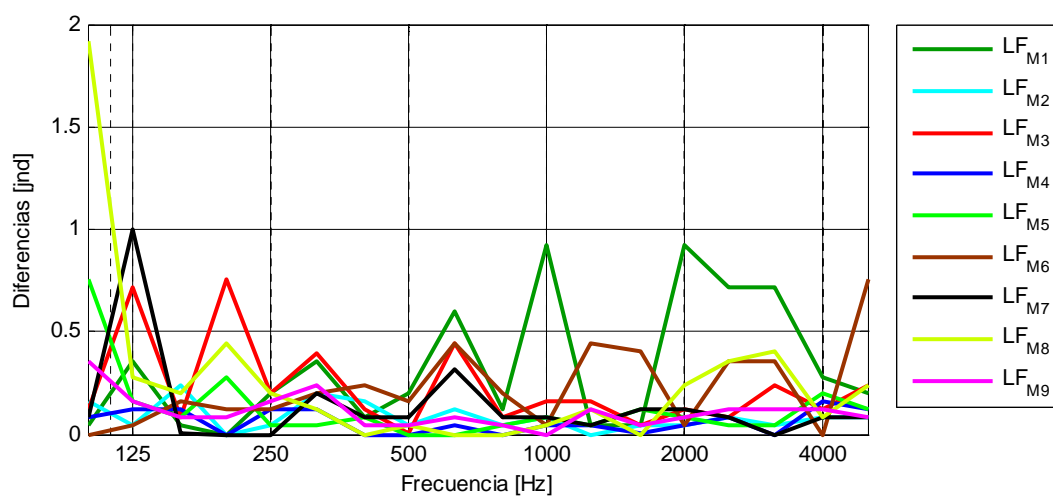


Figura 88. Diferencias entre los valores de LF medidos para cada zona y tipo de señal (LF barrido – LF MLS)

Se van a comentar los resultados obtenidos por posiciones para las tres combinaciones de altavoces promediadas. T20 es uno de los parámetros con mayores diferencias entre posiciones y frecuencias. Las curvas por posiciones no presentan en ningún caso una pendiente suave como se ve en la Figura 89, siendo más irregulares cuando se trabaja con los altavoces de surround. La posición con datos más irregulares y mayores diferencias entre bandas adyacentes es la M8, independientemente de la combinación de altavoces. Si se miran los valores promedios por zona de frecuencia (Tabla. XLIII) en la mayoría de los puntos los valores son similares. Destaca el valor de baja frecuencia de M5 ya que es mucho mayor que el resto especialmente para el conjunto de altavoces de surround. Además la posición M8 presenta valores inferiores al resto en baja y media frecuencia siendo el único promedio menor de 0,5 s (0,448 s).

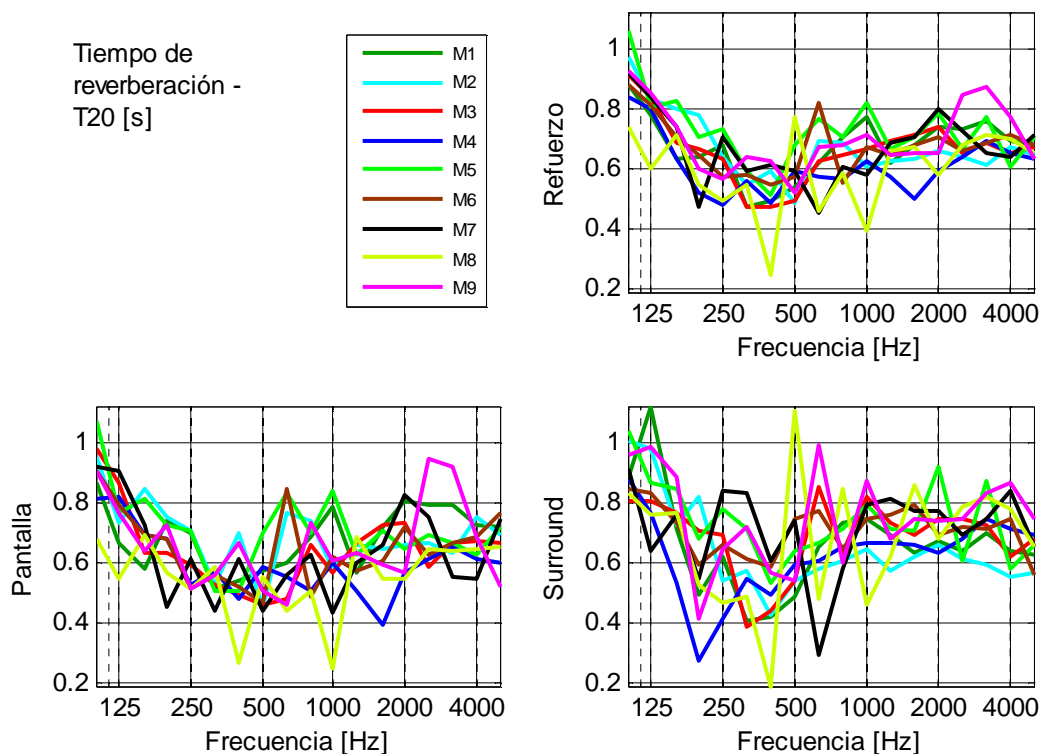


Figura 89. T20 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

T20 [s]	Sist. Refuerzo			Pantalla			Surround		
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
M1	0,680	0,623	0,714	0,678	0,624	0,762	0,708	0,622	0,652
M2	0,762	0,614	0,644	0,754	0,648	0,675	0,774	0,562	0,601
M3	0,701	0,599	0,686	0,705	0,553	0,675	0,695	0,670	0,701
M4	0,639	0,567	0,619	0,685	0,537	0,572	0,569	0,613	0,689
M5	0,787	0,691	0,707	0,765	0,700	0,676	0,820	0,675	0,726
M6	0,700	0,634	0,689	0,692	0,584	0,678	0,713	0,709	0,705
M7	0,712	0,588	0,705	0,676	0,546	0,681	0,755	0,638	0,747
M8	0,607	0,518	0,665	0,597	0,448	0,611	0,639	0,617	0,764
M9	0,721	0,643	0,739	0,721	0,643	0,739	0,770	0,708	0,779

Tabla. XLIII. T20 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

Los valores de T30 se presentan en la Tabla. XLIV y la Figura 90. Estos valores son similares a los de T20 aunque los datos en M8 no son tan irregulares. Las curvas son más suaves y existen menores diferencias entre los distintos puntos. Las diferencias máximas entre las combinaciones de altavoces están entre 50 ms y 100 ms en la mayoría de los puntos, alcanzando un máximo de 213 ms en frecuencias medias del punto M8. De nuevo el valor máximo aparece para las frecuencias bajas de M5 con 0,809 s.

T30 [s]	Sist. Refuerzo			Pantalla			Surround		
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
M1	0,710	0,658	0,677	0,686	0,657	0,680	0,747	0,659	0,672
M2	0,750	0,658	0,657	0,748	0,701	0,694	0,750	0,600	0,605
M3	0,708	0,622	0,653	0,704	0,579	0,641	0,713	0,686	0,670
M4	0,687	0,636	0,685	0,741	0,645	0,692	0,608	0,621	0,675
M5	0,749	0,663	0,674	0,709	0,680	0,692	0,809	0,635	0,654
M6	0,714	0,669	0,697	0,696	0,697	0,689	0,740	0,627	0,711
M7	0,716	0,599	0,683	0,677	0,600	0,704	0,774	0,597	0,655
M8	0,622	0,577	0,663	0,625	0,499	0,684	0,627	0,712	0,645
M9	0,696	0,666	0,750	0,709	0,686	0,753	0,666	0,630	0,738

Tabla. XLIV. T30 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

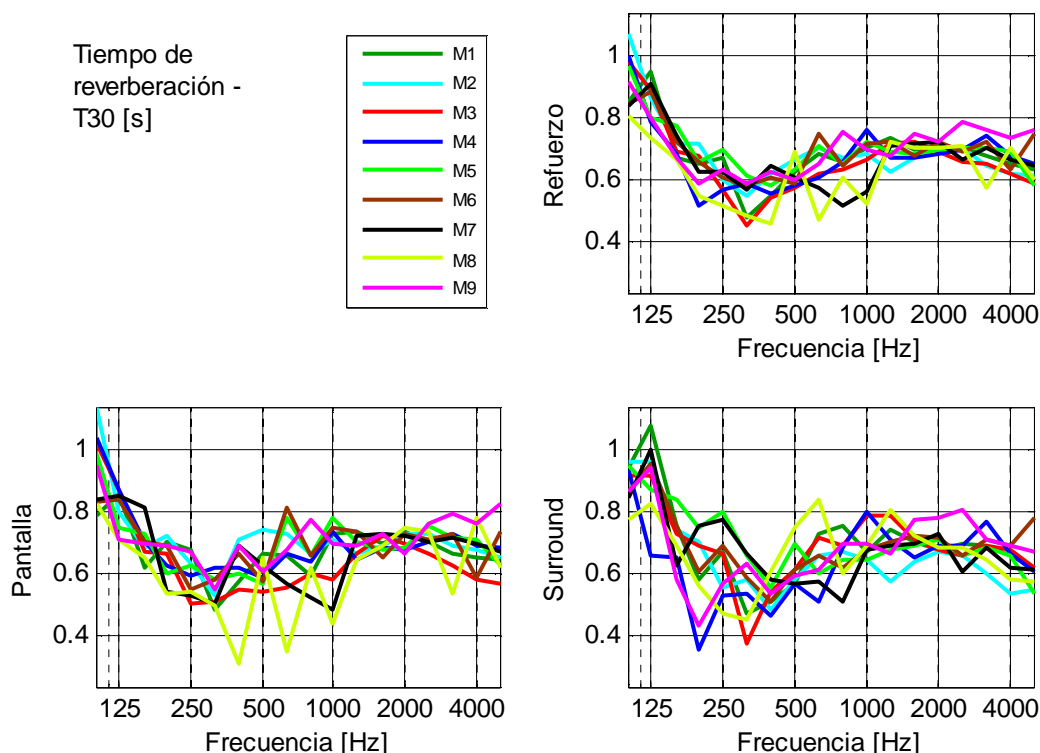


Figura 90. T30 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

En 100 Hz, EDT varía entre 0,5 s y 1,5 s dependiendo de la posición para los altavoces de surround, como se ve en la Figura 91. Estas variaciones se reducen si se promedian todos los altavoces o únicamente los de pantalla, esto ocurre tanto para frecuencias bajas como para medias y altas. El punto M2 con los altavoces de surround presenta valores similares a T20 y T30 y mucho mayores al resto de las posiciones (ver Tabla. XLV). Son especialmente bajos los valores obtenidos con los altavoces de pantalla para frecuencias medias no llegando a 0,2 s en 6 de las 9 posiciones. Además encontramos valores por debajo de los 0,1 s en las posiciones M4 y M8. Con los altavoces de surround se obtienen mayor sensación de reverberación que con los de pantalla en todas las posiciones.

EDT [s]	Sist. Refuerzo			Pantalla			Surround		
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
M1	0,532	0,241	0,287	0,488	0,170	0,124	0,619	0,349	0,531
M2	0,512	0,313	0,480	0,360	0,231	0,291	0,729	0,517	0,764
M3	0,546	0,285	0,389	0,449	0,272	0,239	0,714	0,298	0,650
M4	0,580	0,195	0,192	0,527	0,186	0,091	0,631	0,212	0,347
M5	0,569	0,282	0,423	0,454	0,306	0,372	0,741	0,226	0,480
M6	0,544	0,181	0,169	0,563	0,102	0,139	0,509	0,300	0,215
M7	0,552	0,243	0,317	0,550	0,174	0,273	0,506	0,337	0,383
M8	0,483	0,149	0,242	0,466	0,094	0,248	0,509	0,230	0,224
M9	0,453	0,164	0,323	0,424	0,146	0,315	0,464	0,193	0,341

Tabla. XLV. EDT para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

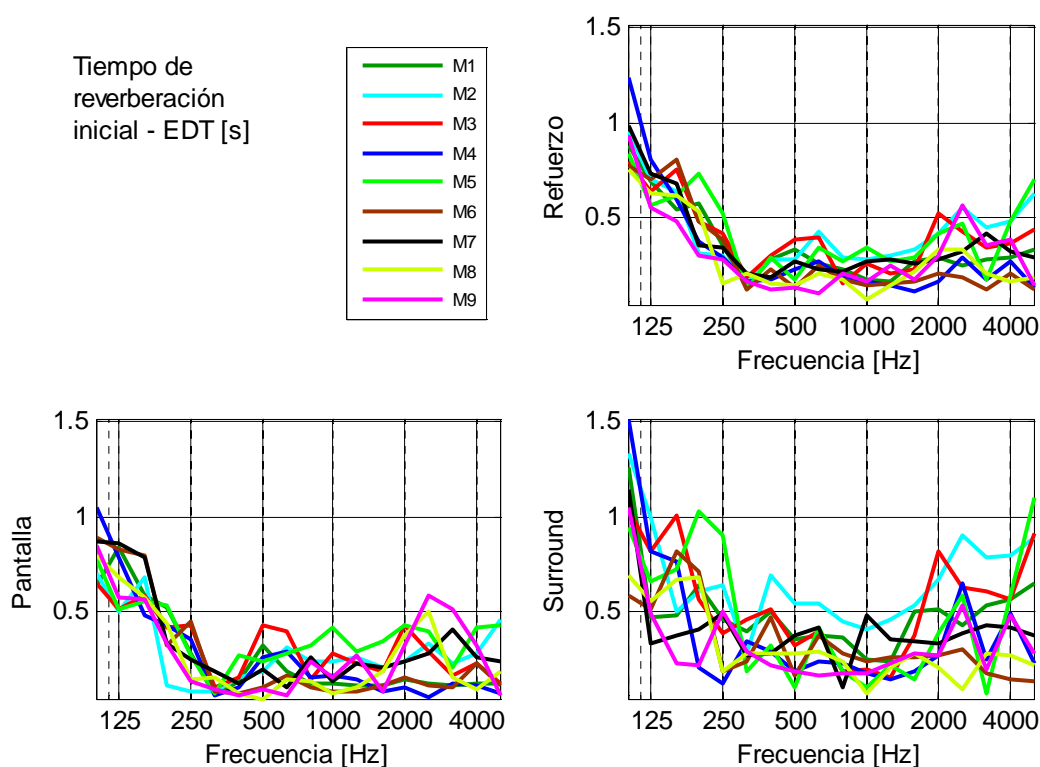


Figura 91. EDT para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

C80 presenta valores inferiores para la combinación de los altavoces de surround en la mayoría de las posiciones de medida, así como mayores diferencias entre las distintas posiciones. Cabe destacar el punto M2 que toma valores especialmente bajos como se ve en la Figura 92. Las diferencias máximas entre las

distintas posiciones están cerca de 6 dB, en casos como la banda de 500 Hz y los puntos M2 y M6. Los valores tan altos de C80 para todos los puntos, incluso los más alejados de la audiencia o con valores “bajos”, indican una gran nitidez en la sala.

C80 [dB]	Sist. Refuerzo			Pantalla			Surround		
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
M1	9,33	14,12	14,57	9,12	14,48	16,81	9,64	13,58	11,20
M2	8,89	12,86	13,37	10,51	15,19	16,86	6,45	9,35	8,14
M3	8,77	14,19	13,10	9,78	14,25	15,15	7,25	14,09	10,02
M4	9,87	15,59	15,17	10,00	17,33	18,49	9,68	12,97	10,19
M5	9,68	15,89	14,87	10,98	17,06	17,35	7,73	14,13	11,14
M6	9,25	17,11	15,45	9,11	18,78	17,95	9,47	14,59	11,69
M7	8,77	15,37	14,00	10,18	17,92	15,73	6,66	11,54	11,40
M8	9,52	15,67	15,06	9,78	17,18	16,51	9,13	13,41	12,90
M9	10,04	16,39	14,21	10,91	17,64	16,19	8,73	14,52	11,24

Tabla. XLVI. C80 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

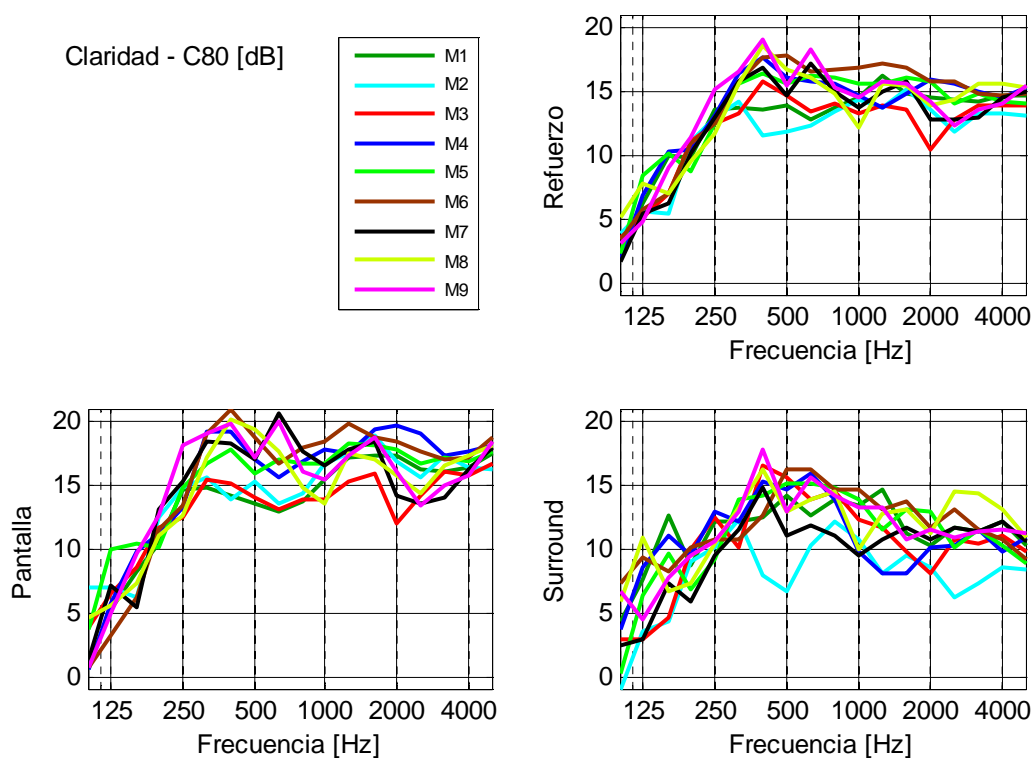


Figura 92. C80 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

Las diferencias entre puntos en D50 son muy pequeñas porque toma valores muy próximos a 1 en frecuencias medias y altas. Para los altavoces de pantalla no existen diferencias perceptibles en media y alta frecuencias como se puede apreciar en la Tabla. XLVII. Si que existen diferencias en los altavoces de surround con un valor muy inferior para el punto M8 que para el resto de altavoces.

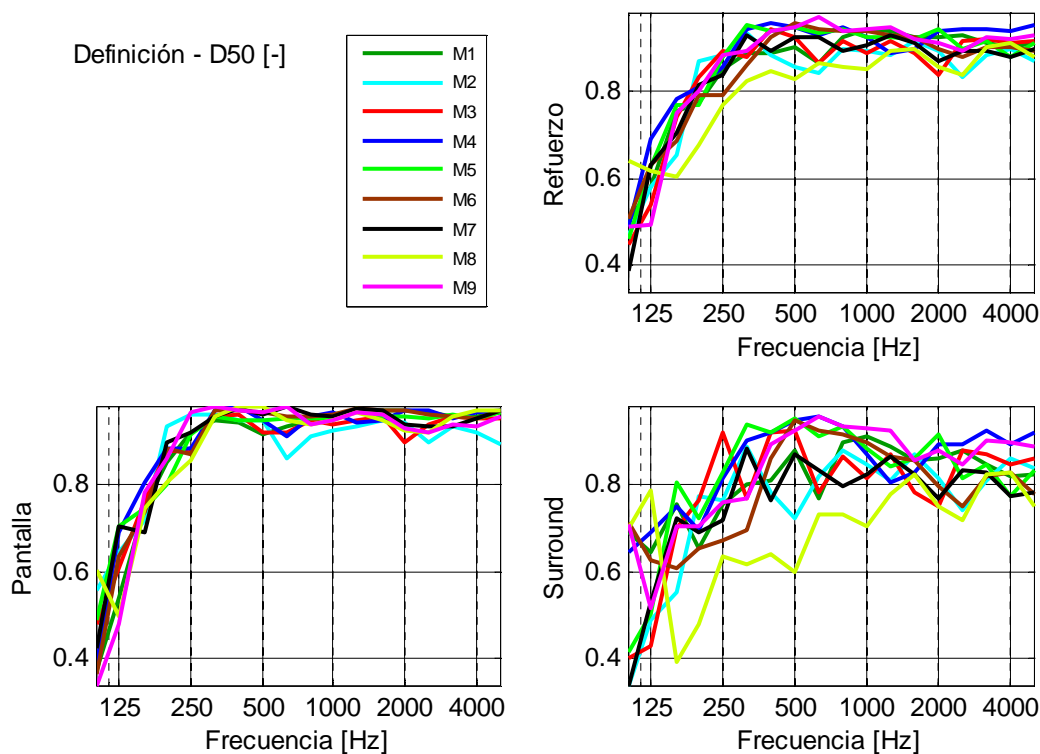


Figura 93. D50 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

D50 [-]	Sist. Refuerzo			Pantalla			Surround		
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
M1	0,73	0,91	0,92	0,73	0,95	0,97	0,72	0,86	0,85
M2	0,73	0,88	0,88	0,80	0,92	0,92	0,64	0,81	0,82
M3	0,72	0,91	0,90	0,76	0,94	0,94	0,66	0,86	0,83
M4	0,76	0,93	0,94	0,77	0,95	0,96	0,75	0,91	0,89
M5	0,74	0,94	0,91	0,77	0,96	0,96	0,70	0,91	0,84
M6	0,71	0,94	0,90	0,74	0,97	0,97	0,66	0,90	0,81
M7	0,72	0,91	0,89	0,77	0,97	0,95	0,65	0,83	0,80
M8	0,69	0,86	0,88	0,75	0,96	0,95	0,60	0,70	0,78
M9	0,72	0,95	0,92	0,74	0,96	0,94	0,69	0,93	0,88

Tabla. XLVII. D50 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

El Tiempo Central presenta muchas diferencias entre unas y otras combinaciones de altavoces para los distintos puntos. Existen tres posiciones con valores más altos que el resto en frecuencias medias. Estas son M1 y M2 que toma valores que alcanzan hasta 50 ms más que el resto de posiciones para la combinación de los altavoces de pantalla y en M8 ocurre lo mismo para los altavoces de surround. Existe un pico muy marcado para esta última posición (M8) en la banda de 1000 Hz debido a todos los altavoces ya que no desaparece en ningún caso (ver Figura 94). A su vez, para M4 los promedios calculados son bastante menores al resto para los altavoces de pantalla, ya que no alcanzan los 10 ms en alta frecuencias o los 60 ms en baja. La Tabla. XLVIII muestra los datos para los distintos puntos donde se puede ver que en baja frecuencia Ts disminuye según los puntos están más alejados de la pantalla si se trabaja con los altavoces tras ella y aumenta con los de surround.

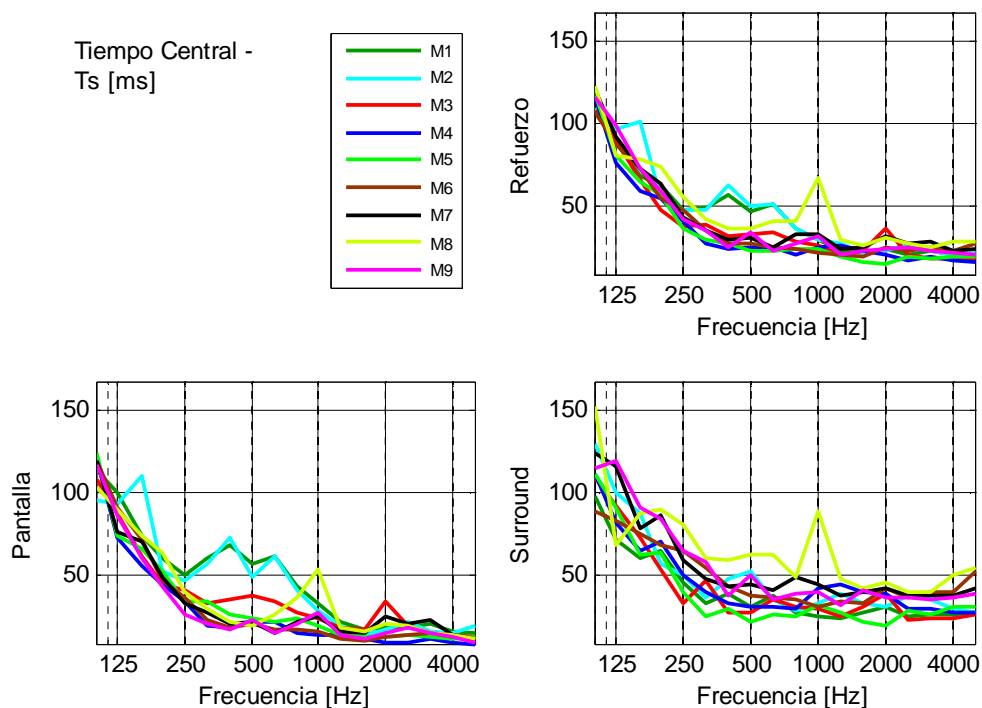


Figura 94. TS para distintas posiciones y combinaciones de altavoces



<b>Ts [ms]</b>	<b>Sist. Refuerzo</b>			<b>Pantalla</b>			<b>Surround</b>		
<b>FREC.[Hz]</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>
M1	70,2	40,0	20,7	75,9	46,8	16,7	61,8	29,9	26,8
M2	76,0	42,3	22,5	75,6	44,7	16,3	76,4	38,9	31,7
M3	64,4	28,7	21,6	62,3	28,8	17,8	67,5	28,6	27,2
M4	62,1	24,0	18,2	57,3	16,8	9,2	69,5	34,9	31,6
M5	64,1	22,9	17,4	63,5	20,7	11,9	65,1	26,3	25,6
M6	67,2	23,9	23,0	64,0	16,0	11,7	72,0	35,6	39,9
M7	71,1	28,5	26,0	62,0	19,0	17,3	84,9	42,8	39,1
M8	75,5	41,5	27,2	66,0	28,4	15,5	89,6	61,1	44,7
M9	70,4	26,5	22,5	58,3	18,8	13,0	88,4	38,2	36,7

Tabla. XLVIII. TS para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

Los datos obtenidos para LF se muestran en la Tabla. XLIX y la Figura 95. Obviamente los valores para todos los puntos son más altos medidos con los altavoces de surround que con los de pantalla. Si se analizan las distintas posiciones, los altavoces de pantalla no proporcionan muchas diferencias en cuanto a este parámetro en los distintos puntos. Aunque se obtiene un valor bastante alto para el punto M8 en baja frecuencia (0,47) debido a ser un punto muy alejado y al lateral de la sala. Dentro de los resultados con los altavoces de surround los valores inferiores se encuentran en M3 y los superiores en M7, aunque M6 y M8 también toman valores muy altos siendo las 3 posiciones del lateral izquierdo.

<b>LF [-]</b>	<b>Sist. Refuerzo</b>			<b>Pantalla</b>			<b>Surround</b>		
<b>FREC.[Hz]</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>
M1	0,45	0,54	0,59	0,35	0,27	0,39	0,59	0,94	0,87
M2	0,40	0,38	0,39	0,28	0,20	0,26	0,58	0,66	0,59
M3	0,32	0,28	0,32	0,26	0,19	0,25	0,41	0,42	0,44
M4	0,60	0,43	0,47	0,35	0,18	0,12	0,96	0,80	1,01
M5	0,35	0,32	0,32	0,25	0,13	0,16	0,51	0,60	0,55
M6	0,55	0,62	0,75	0,34	0,16	0,22	0,86	1,31	1,56
M7	0,52	0,71	0,91	0,24	0,11	0,24	0,94	1,59	1,93
M8	0,66	0,55	0,84	0,47	0,14	0,31	0,95	1,16	1,63
M9	0,49	0,42	0,50	0,29	0,10	0,15	0,79	0,90	1,04

Tabla. XLIX. LF para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

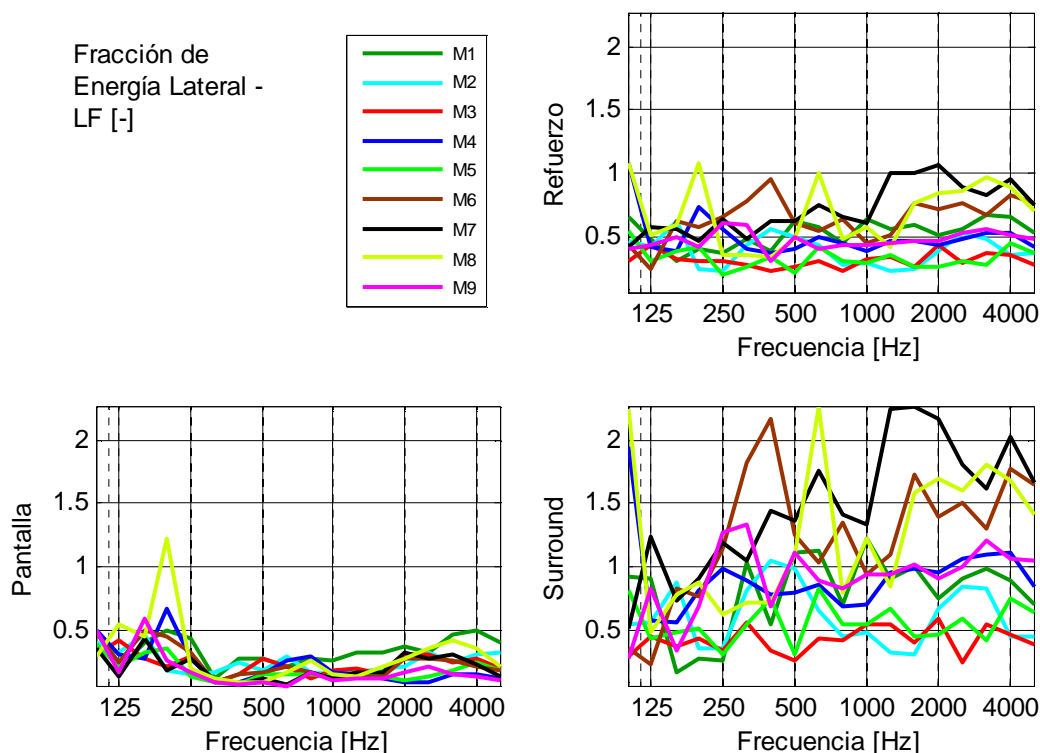


Figura 95. LF para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

Por tanto, las diferencias entre ambos tipos de señal de excitación no son excesivamente altas, especialmente para los parámetros subjetivos, no pudiendo descartar el uso de una u otra señal para el cálculo de los parámetros acústicos de esta sala. La diferencia entre señales se debe en gran medida a los datos obtenidos con los altavoces de surround y los del punto M8 donde las diferencias se incrementan en casi todos los parámetros.

En cuanto a los distintos parámetros, los tiempos de reverberación son más altos en todos los puntos con los altavoces de pantalla que con los de surround presentando mayores diferencias con el punto M8. Este mismo punto tiene diferencias apreciables para  $D_{50}$  y para  $T_s$  en las medidas realizadas con los altavoces de surround. Con lo que se podría determinar que no es un punto bueno para realizar las medidas con estos altavoces.

### 6.2.6. Distribución en función de la distancia

Los datos que se incluyen en este apartado únicamente corresponden a los altavoces de pantalla ya que no se tienen los valores de los parámetros para cada altavoz de surround sino para el conjunto y no se pueden calcular las distancias.

EDT muestra una pendiente de caída en frecuencias medias (500 Hz y 630 Hz) con una reducción de aproximadamente desde 0,5 s a valores inferiores a 0,1 s. El resto de bandas tienen mayor dispersión y sin tendencias claras.

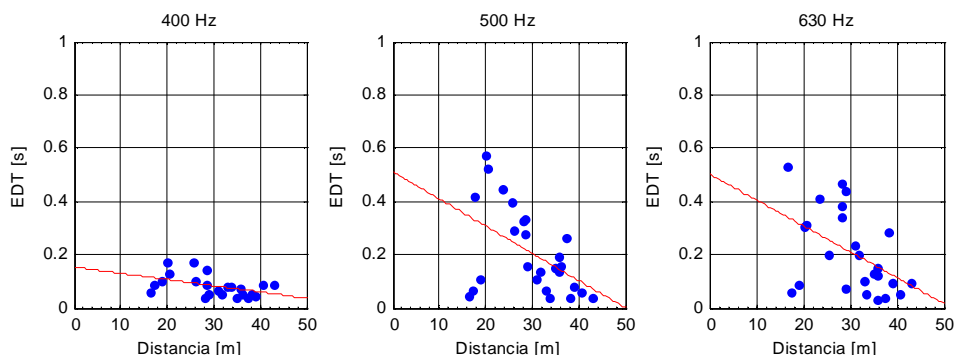


Figura 96. EDT para media frecuencia en función de la distancia fuente - receptor

T20 y T30 presentan una ligera caída con la distancia en baja frecuencia, más pronunciada en las bandas de 100 Hz, 125 Hz y 200 Hz como se observa en la Figura 97 y la Figura 98. La frecuencia intermedia, 160 Hz, no muestra ninguna pendiente característica. El comportamiento es similar para ambos parámetros con datos menos dispersos para T30.

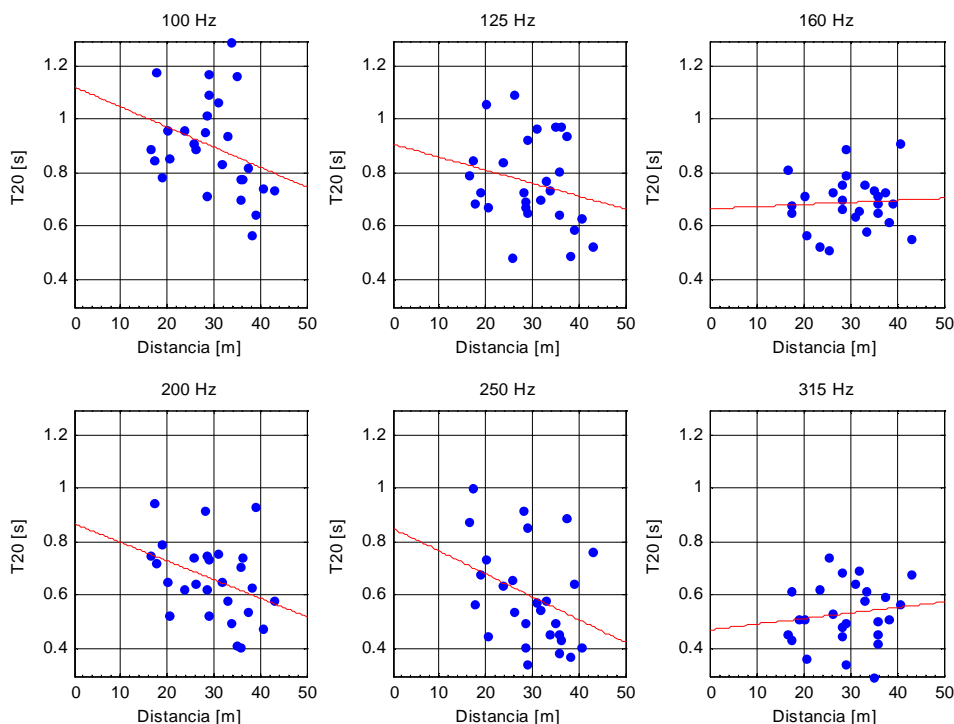


Figura 97. T20 para baja frecuencia en función de la distancia fuente - receptor

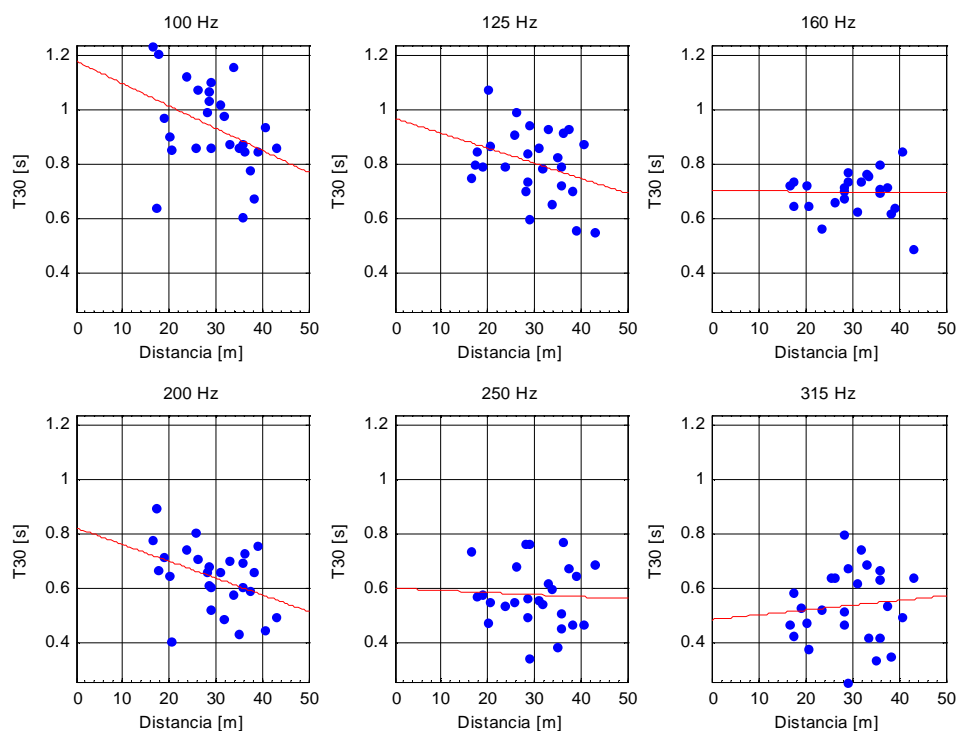


Figura 98. T30 en baja frecuencia en función de la distancia fuente - receptor

D50 presenta valores dispersos en baja frecuencia y muy pocas diferencias en media y alta frecuencia por lo que no se incluyen los datos en función de la distancia. Por otro lado, si se observa la Figura 99 hay un aumento claro del valor de C80 en frecuencias medias (400 Hz, 500 Hz y 630 Hz) pasando de 12 dB a 20 dB al alejarnos de la fuente.

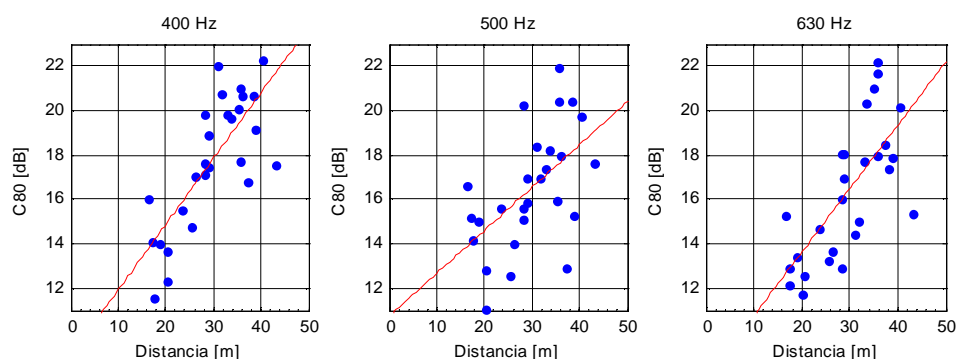


Figura 99. C80 en frecuencias medias en función de la distancia fuente - receptor

TS disminuye visiblemente con la distancia en las frecuencias entre 400 Hz y 630 Hz. En la Figura 100 se ve como TS pasa de 60 ms a 15 ms concentrándose el mayor número de medidas en los valores más bajos.

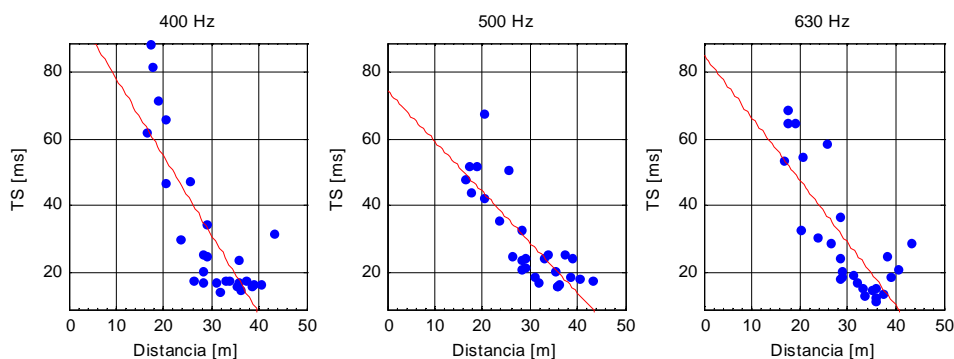


Figura 100. TS en frecuencias medias en función de la distancia fuente - receptor

No se puede obtener una clara relación entre distancia fuente-receptor y los distintos parámetros, pero es evidente que si  $C80$  aumenta con la frecuencia disminuye  $T_s$ .

### 6.2.7. Valores globales

En la Tabla. L se presentan los valores globales de la sala que resume el comportamiento de la sala que se ha visto en apartados anteriores. En cuanto al tiempo de reverberación,  $T20_{med}$  es menor para los altavoces de pantalla que para los altavoces de surround pero en  $T30_{med}$  no existen diferencias entre el uso de uno u otro altavoz.  $EDT_m$  es casi el doble para los altavoces de surround, esto es debido al número de altavoces y la distribución por la sala. En cuanto a la nitidez e inteligibilidad de la sala es muy alta y se ve incrementada por el uso de los altavoces de pantalla con valores de 16,65 dB para  $C80_m$  y 0,95 para  $D50_m$ . Al estar trabajando con un grupo de 12 altavoces de surround, las señales directas de cada uno de ellos llegan de manera escalonada y unidas a algunas reflexiones por lo que la energía no se concentra tan claramente en los primeros milisegundos y el centro de gravedad ( $Ts_m$ ) es mayor que para los altavoces de pantalla. Por último, los resultados de  $LF_m$  no son comparables ya que, evidentemente, cuando se excita la sala con los altavoces de surround gran cantidad de la energía se recoge por el micrófono bidireccional. Además, no es posible orientarlo a la fuente sonora ya que son múltiples fuentes.

	Sist. Refuerzo		Pantalla		Surround	
	Valor	$\sigma$	Valor	$\sigma$	Valor	$\sigma$
$T20_{med}$ [s]	0,612	0,216	0,587	0,213	0,648	0,215
$T30_{med}$ [s]	0,641	0,126	0,643	0,141	0,637	0,100
$EDT_m$ [s]	0,227	0,178	0,185	0,160	0,298	0,185
$C80_m$ [dB]	15,24	3,67	16,65	2,59	13,13	4,04
$D50_m$ [-]	0,91	0,11	0,95	0,04	0,86	0,15
$Ts_m$ [ms]	30,9	17,6	26,7	15,6	37,1	4,0
$LF_m$ [-]	0,48	0,59	0,24	0,27	0,83	0,74

Tabla. L. Valores globales para la sala calculados a partir de todo el sistema de refuerzo sonoro, sólo los altavoces de pantalla y sólo el sistema de surround

# **7 Resultados de la simulación**





## 7.1. Fuente omnidireccional

En este apartado se presentan los datos de la simulación realizada tras la validación del recinto utilizando una fuente omnidireccional.

### 7.1.1. Promedios de la sala

El tiempo de reverberación promedio de la sala presenta valores similares para T20 y para T30, aunque estos últimos son un poco mayores en frecuencias medias (en torno a 500 Hz). EDT toma valores entre 100 ms y 200 ms menores a T30, lo cual indica que la sensación de reverberación es menor a la real. Los valores de estos parámetros se muestran en la Tabla. LI, la Figura 101 y la Figura 102. Las desviaciones obtenidas entre puntos son pequeñas en todos los casos.

Frec.[Hz]	T20 [s]	$\sigma_{T20}$	T30 [s]	$\sigma_{T30}$	EDT [s]	$\sigma_{EDT}$
100	0,94	0,06	0,90	0,04	0,69	0,12
125	0,88	0,05	0,85	0,03	0,66	0,11
160	0,82	0,06	0,77	0,02	0,60	0,10
200	0,77	0,06	0,73	0,03	0,55	0,09
250	0,71	0,06	0,69	0,03	0,51	0,09
315	0,66	0,06	0,66	0,04	0,50	0,09
400	0,61	0,06	0,63	0,03	0,48	0,08
500	0,56	0,06	0,60	0,04	0,47	0,08
630	0,56	0,06	0,60	0,04	0,47	0,08
800	0,57	0,06	0,61	0,03	0,47	0,08
1000	0,58	0,06	0,61	0,04	0,48	0,08
1250	0,62	0,05	0,63	0,03	0,50	0,08
1600	0,68	0,05	0,67	0,03	0,53	0,07
2000	0,71	0,05	0,70	0,02	0,56	0,07
2500	0,70	0,04	0,70	0,02	0,57	0,08
3150	0,69	0,04	0,69	0,02	0,57	0,08
4000	0,67	0,04	0,67	0,02	0,55	0,08
5000	0,60	0,03	0,62	0,02	0,52	0,07

Tabla. LI. Valores simulados de T20, T30 y EDT promedio de la sala

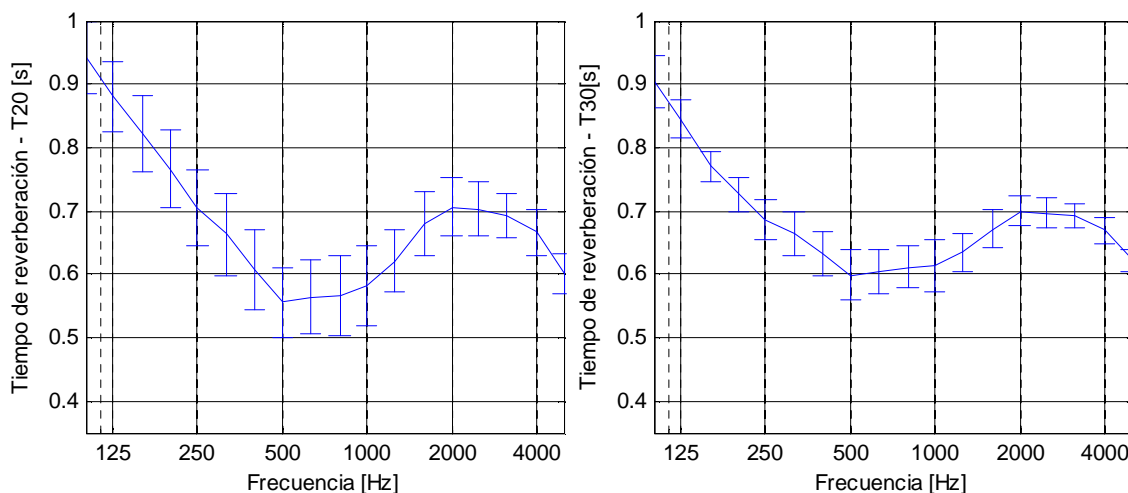


Figura 101. T20 [s] y T30 [s] promedio simulado con fuente omnidireccional

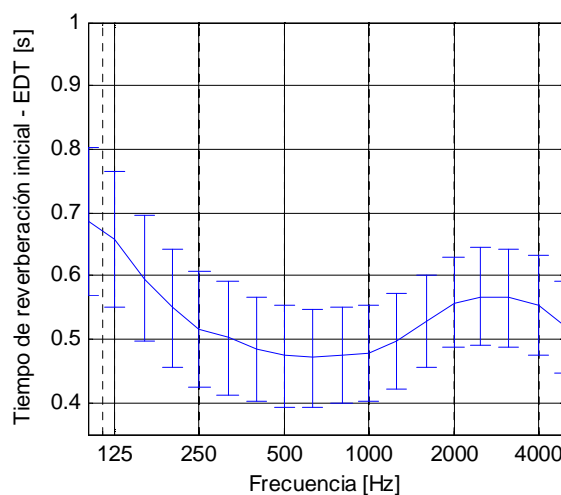


Figura 102. EDT [s] promedio simulado con fuente omnidireccional

De nuevo, se comprueba la nitidez y definición que presenta la sala observando los valores superiores a 7 dB de C80 y a 0,69 de D60 en todas las bandas. Además, C80 alcanza 12 dB en frecuencias medias (entre 500 Hz y 800 Hz) con desviaciones inferiores a 1,60 dB. Para la palabra, la mayor parte de la energía se concentra en frecuencias medias y en esa zona es donde D50 toma los mayores valores entre 0,80 y 0,85. La tendencia de ambas curvas es similar como se aprecia en la Figura 103.

El Tiempo Central toma valores pequeños. En la banda de 100 Hz presenta su valor más alto con 44 ms y baja gradualmente hasta los 22 ms en la banda de 500 Hz donde presenta su valor mínimo. Las desviaciones no son muy altas, no superando en ninguna banda los 7 ms.

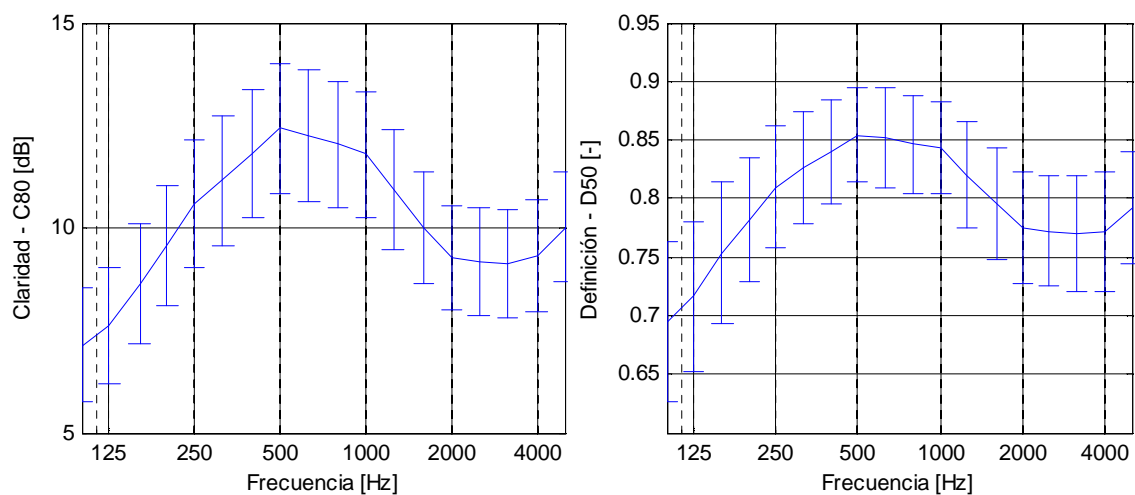


Figura 103. C80 [dB] y D50 [-] promedio simulado con fuente omnidireccional

FREC.[Hz]	C80 [dB]	$\sigma_{C80}$	D50 [-]	$\sigma_{D50}$	TS [ms]	$\sigma_{TS}$	LF [-]	$\sigma_{LF}$
100	7,14	1,39	0,69	0,07	44,07	6,48	0,16	0,04
125	7,61	1,42	0,72	0,06	40,45	6,22	0,16	0,05
160	8,64	1,47	0,75	0,06	35,58	5,77	0,15	0,04
200	9,55	1,46	0,78	0,05	31,91	5,23	0,14	0,04
250	10,57	1,56	0,81	0,05	28,37	5,02	0,13	0,04
315	11,15	1,58	0,83	0,05	26,35	4,49	0,12	0,04
400	11,80	1,55	0,84	0,04	24,64	4,18	0,12	0,04
500	12,42	1,59	0,85	0,04	22,78	3,90	0,11	0,04
630	12,24	1,60	0,85	0,04	23,21	4,02	0,11	0,04
800	12,04	1,53	0,85	0,04	23,63	3,92	0,11	0,04
1000	11,79	1,53	0,84	0,04	24,05	3,87	0,11	0,04
1250	10,93	1,48	0,82	0,05	26,73	4,19	0,11	0,04
1600	10,00	1,38	0,80	0,05	29,72	4,39	0,12	0,04
2000	9,25	1,27	0,78	0,05	32,28	4,60	0,12	0,04
2500	9,17	1,34	0,77	0,05	32,60	4,74	0,12	0,04
3150	9,14	1,32	0,77	0,05	32,87	4,85	0,13	0,04
4000	9,31	1,36	0,77	0,05	32,35	4,95	0,14	0,04
5000	10,02	1,34	0,79	0,05	29,83	4,77	0,14	0,04

Tabla. LII. Valores de C80, D50, Ts y LF simulados con fuente omnidireccional

Por último, LF toma valores pequeños con desviaciones altas comparadas con su valor, esto se debe a la dependencia de la posición relativa entre fuente y receptor.

No presenta grandes diferencias entre bandas de frecuencia como se puede ver en la Tabla. LII.

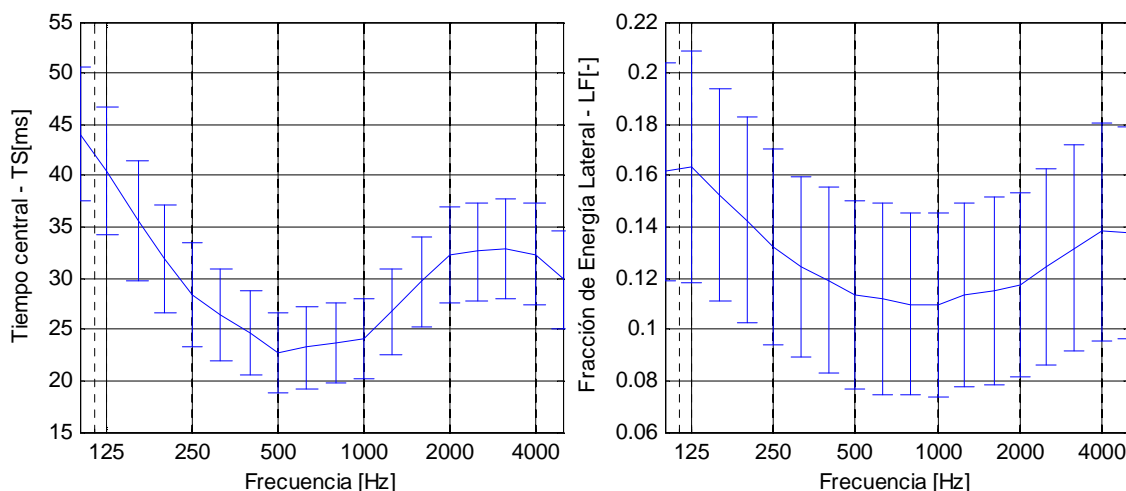


Figura 104. Ts [ms] y LF [-] promedio simulado con fuente omnidireccional

### 7.1.2. Promedios por posición de fuente

No existen grandes diferencias en ninguno de los parámetros en los promedios por posición de fuente. Como se muestra en la Figura 105, no existe ninguna diferencia en T30 y las diferencias en T20 son pequeñas, donde únicamente se ven variaciones claras entre 500 Hz y 2000 Hz para la Fuente 2. Para esta posición de fuente se obtienen valores de T20 un poco inferiores a resto.

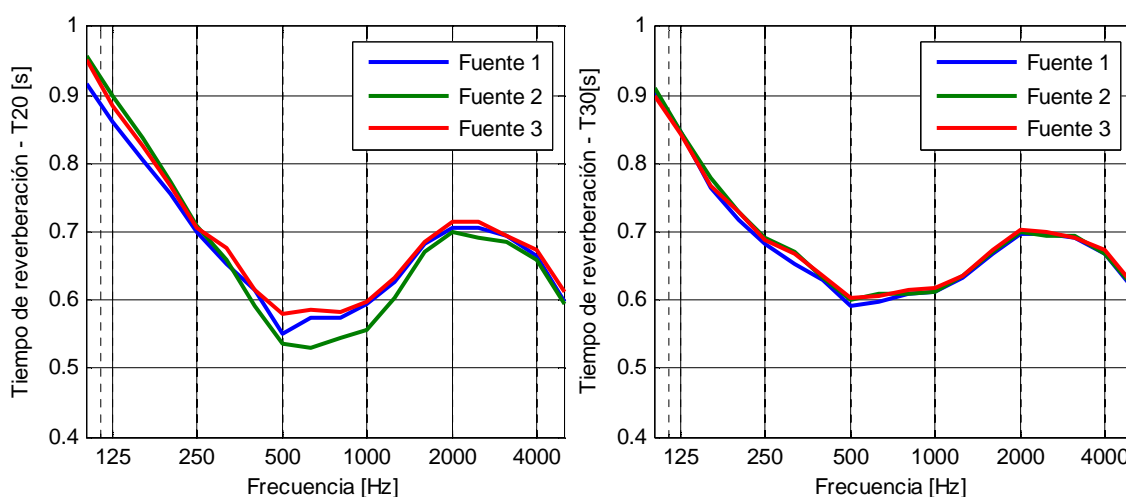


Figura 105. Tiempo de reverberación promedio simulado por posición de fuente omnidireccional

Sí que se aprecian diferencias en EDT entre las 3 posiciones de fuente. Con la fuente 3 la reverberación percibida es más alta con diferencias que alcanzan los 100

ms respecto a la fuente 1 en frecuencias medias. En baja frecuencia las diferencias más altas se presentan entre la fuente 3 y la fuente 2.

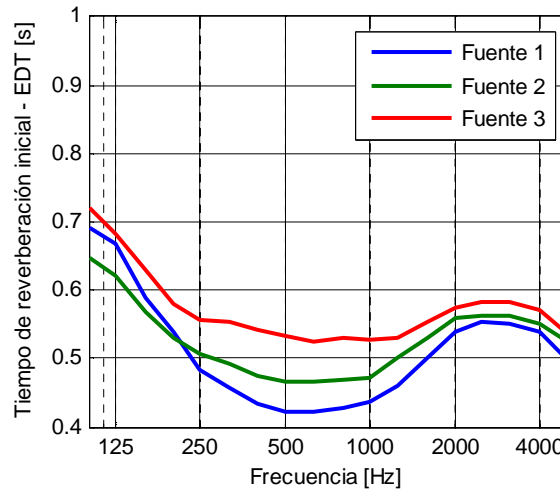


Figura 106. EDT promedio simulado por posición de fuente omnidireccional

El altavoz colocado en la posición central (F2) proporciona más claridad que las otras dos posiciones, pero las diferencias entre ellos no alcanzan 1 dB, es decir, no son diferencias perceptibles. Las diferencias en D50 según la posición de fuente tampoco son perceptibles ya que no superan 1 JND, pero si se ve que los datos obtenidos con la fuente 1 son mayores que los de la posiciones 2 y 3 como se muestra en la Figura 107.

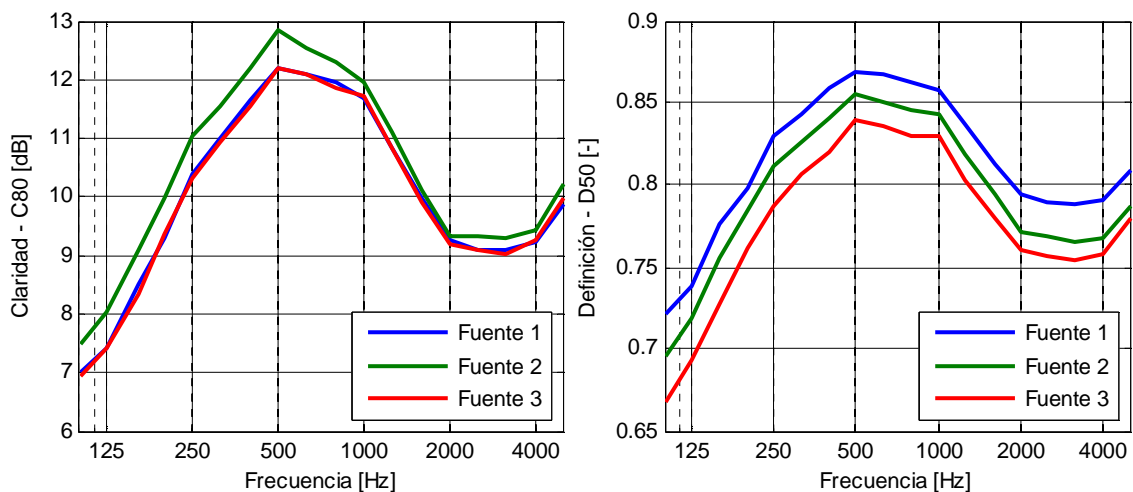


Figura 107. Claridad y Definición simulados por posición de fuente omnidireccional

En la Figura 108 se presentan los promedios por posición de fuente de Ts y LF. Las diferencias en Ts son muy pequeñas, inferiores a 5 ms, por lo que no se puede apreciar ninguna influencia de la posición de fuente. En el caso de LF, la influencia es

clara ya que la fuente en la posición central (F2) proporciona un ancho aparente inferior que en las posiciones laterales.

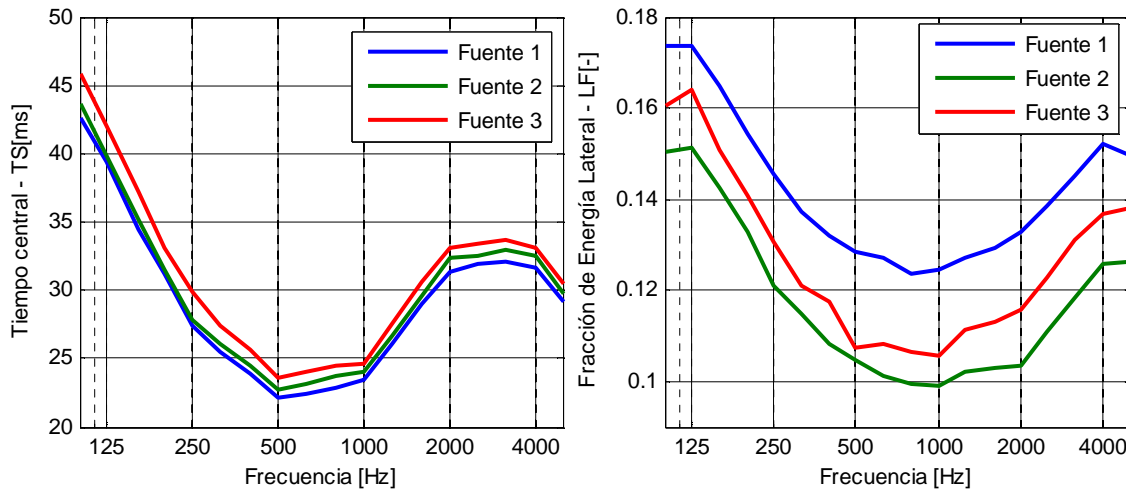


Figura 108. TS y LF promedio simulados por posición de fuente omnidireccional

### 7.1.3. Promedios por zonas

Si se estudian los valores de T20 y de T30 para los datos simulados con fuente omnidireccional, no se observan grandes variaciones entre unos puntos y otros siendo las diferencias máximas inferiores a 100 ms. El punto que presenta mayor tiempo de reverberación en ambos casos es el punto M8, con valores muy parecidos a los de M7. Los valores inferiores se encuentran en el lateral derecho (M3 y M4) como se observa en la Figura 109 y la Figura 110. Se han realizado los promedios por zonas de frecuencia para una visión más directa de los resultados. En la Tabla. LIII y la Tabla. LIV, se puede observar como los 4 primeros puntos toman valores similares en sus promedios con diferencias inferiores a 30 ms. Esto se repite con los puntos 5 y 6 con valores más cercanos en T30 o con los puntos 7, 8 y 9.

T20 [s]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	0,75	0,57	0,65
M2	0,78	0,61	0,70
M3	0,75	0,56	0,64
M4	0,75	0,55	0,66
M5	0,80	0,62	0,69
M6	0,80	0,56	0,67
M7	0,85	0,60	0,69
M8	0,87	0,60	0,69
M9	0,83	0,57	0,68

Tabla. LIII. T20 [s] por zonas simulado con fuente omnidireccional

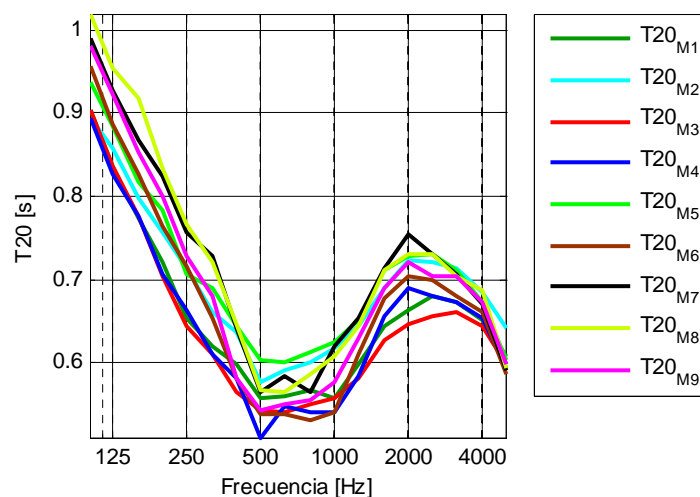


Figura 109. T20 [s] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono

T30 [s]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	0,74	0,58	0,65
M2	0,74	0,60	0,66
M3	0,73	0,58	0,65
M4	0,74	0,59	0,67
M5	0,78	0,63	0,68
M6	0,78	0,62	0,68
M7	0,80	0,65	0,69
M8	0,81	0,66	0,70
M9	0,79	0,64	0,69

Tabla. LIV. T30 [s] por zonas simulado con fuente omnidireccional

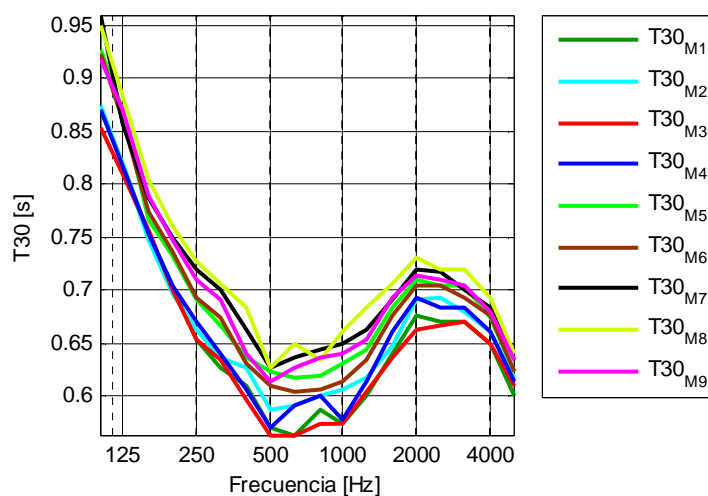


Figura 110. T30 [s] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono

En la Figura 111, se incluyen los valores de EDT en función de la posición de micrófono. Las diferencias entre posiciones son mayores que para T20 o T30, alcanzando los 150 ms. Si se comparan estos resultados con T20 o T30 se ven que son inferiores en todas las bandas. Las posiciones M2 y M5, que son los puntos centrados en la audiencia, presentan mayor sensación de reverberación que el resto

de puntos. Por otro lado, M1, M3, M8 y M9 toma en promedio valores similares como se muestra en la Tabla. LV.

EDT [s]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	0,55	0,44	0,53
M2	0,65	0,57	0,62
M3	0,55	0,42	0,51
M4	0,62	0,47	0,58
M5	0,65	0,53	0,63
M6	0,60	0,51	0,56
M7	0,56	0,46	0,52
M8	0,54	0,48	0,49
M9	0,53	0,43	0,49

Tabla. LV. EDT [s] por zonas simulado con fuente omnidireccional

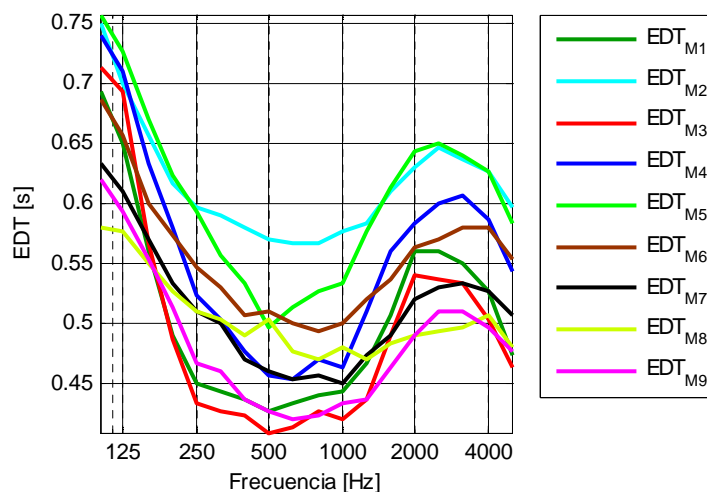


Figura 111. EDT [s] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono

Para todas las posiciones el comportamiento de C80 y D50 en frecuencia es similar; presenta un pico en torno a 500 Hz y un valle en 3150 Hz. Además, toma valores altos, superiores a 6dB para C80 y a 0,60 para D50) lo que implican gran inteligibilidad. Como se ve en la Figura 112 y la Figura 113, las distintas posiciones presentan curvas casi paralelas. En C80, las diferencias máximas alcanzan los 4 dB entre posiciones tomando los valores mínimos en el punto M5 y los máximos en M8. Las posiciones M1, M3 y M7 presentan promedios por bandas similares como se presenta en la Tabla. LVI. En el caso de D50, las diferencias máximas son de 0,15. De nuevo es la posición M5 la que presenta menores valores de este parámetro, aunque es M3 el que presenta mejores resultados en todas las bandas. Entre estos dos puntos hay diferencias perceptibles (superiores a 0,05) en todas las bandas siendo más altas en baja frecuencia.



C80 [dB]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	9,69	12,03	9,53
M2	10,14	12,59	10,03
M3	9,66	12,16	9,72
M4	7,86	10,58	8,26
M5	7,23	9,84	7,65
M6	8,62	11,43	9,02
M7	8,95	12,10	9,69
M8	10,35	13,50	11,29
M9	9,51	12,61	10,16

Tabla. LVI. C80 [dB] por zonas simulado con fuente omnidireccional

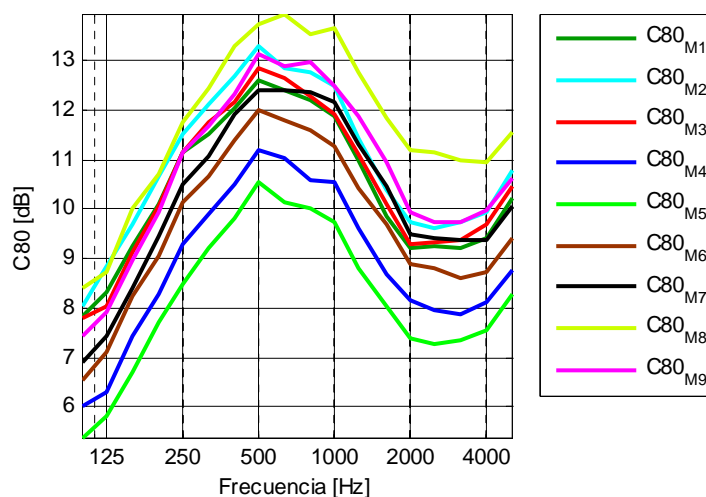


Figura 112. C80 [dB] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono

D50 [-]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	0,81	0,86	0,80
M2	0,81	0,88	0,82
M3	0,83	0,89	0,83
M4	0,74	0,83	0,76
M5	0,70	0,79	0,72
M6	0,72	0,81	0,74
M7	0,72	0,81	0,75
M8	0,75	0,84	0,79
M9	0,79	0,87	0,80

Tabla. LVII. D50 [-] por zonas simulado con fuente omnidireccional

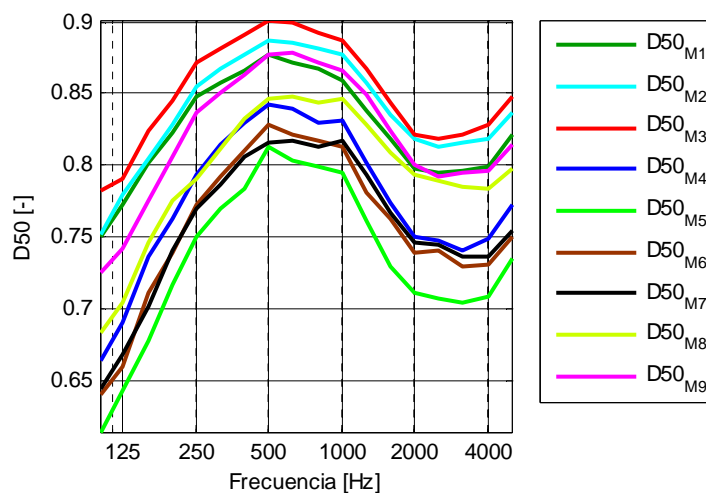


Figura 113. D50 [-] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono

El tiempo correspondiente al centro de gravedad de la respuesta impulsiva ( $T_s$ ) en M5 es mayor al del resto de las posiciones y en M2 es menor. Las diferencias entre estos dos puntos alcanzan su máximo en baja frecuencia con 17 ms, la cual es una diferencia perceptible. Viendo el comportamiento de este parámetro en la Figura 114, se observan tres grupos de curvas entre el máximo y el mínimo. Estos grupos están

formados por las curvas de las posiciones M1 y M3, las de las posiciones M8 y M9 y las posiciones M4, M6 y M7; donde existe un ligero aumento (aproximadamente 5 ms) entre unas y otras posiciones. Por lo tanto, no se encuentran diferencias perceptibles entre la mayoría de las posiciones.

TS [ms]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	29,94	21,84	29,11
M2	26,21	17,89	24,94
M3	29,93	21,30	28,54
M4	37,80	26,67	35,22
M5	40,76	28,47	37,45
M6	37,90	26,77	34,45
M7	38,35	26,69	34,04
M8	34,32	23,93	29,36
M9	34,88	23,99	31,38

Tabla. LVIII. Ts [ms] por zonas simulado con fuente omnidireccional

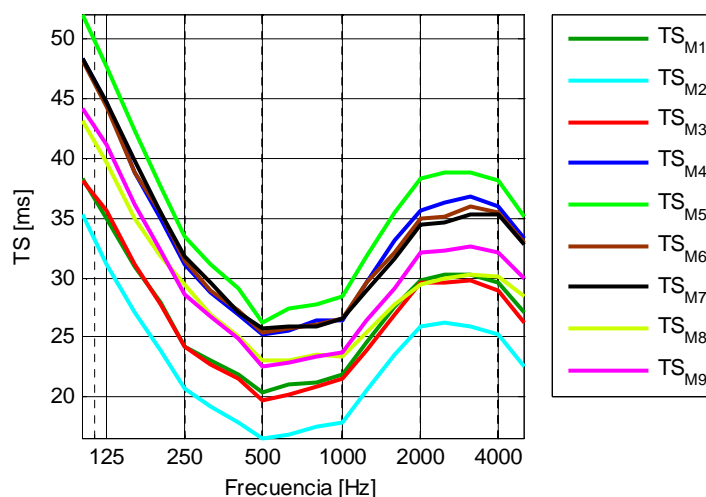


Figura 114. Ts [ms] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono

LF [-]			
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta
M1	0,16	0,12	0,14
M2	0,11	0,08	0,09
M3	0,17	0,12	0,14
M4	0,17	0,15	0,16
M5	0,14	0,11	0,12
M6	0,14	0,11	0,12
M7	0,14	0,11	0,13
M8	0,14	0,10	0,12
M9	0,14	0,10	0,12

Tabla. LIX. LF [-] por zonas simulado con fuente omnidireccional

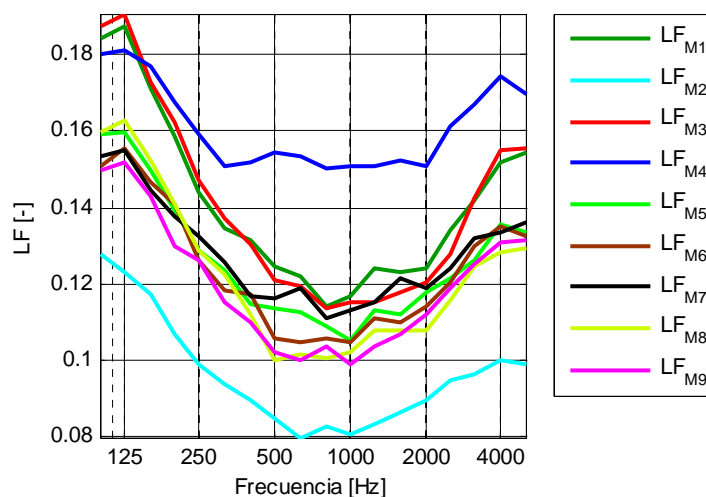


Figura 115. LF [-] simulado en función de la frecuencia y posición de micrófono

Los valores de LF presentan bastantes diferencias, lo cual es razonable ya que un micrófono bidireccional no recogería la misma energía en todas las posiciones. El punto M2, situado en la parte central delantera de la sala, presenta los valores mínimos y el punto M4, posición del lateral derecho, el valor máximo. Entre estas dos posiciones las diferencias superan 1 JND, pero entre el resto de posiciones las diferencias son inferiores.

A continuación se muestran algunos mapas obtenidos con la fuente omnidireccional en EASE. En concreto se ha elegido la banda de octava de 1 kHz. En la Figura 116 se muestra T20 para las tres posiciones de fuente. Como se puede apreciar no existen muchas diferencias entre unas posiciones de fuente y otra. La zona más alejada de la pantalla toma valores de T20 superiores a las delanteras, y según sea la posición de la fuente esos valores se desplazan a un lado u otro de la sala. No se incluyen los mapas para T30 porque son muy similares a los de T20 pero con menos variaciones de unas zonas a otras.

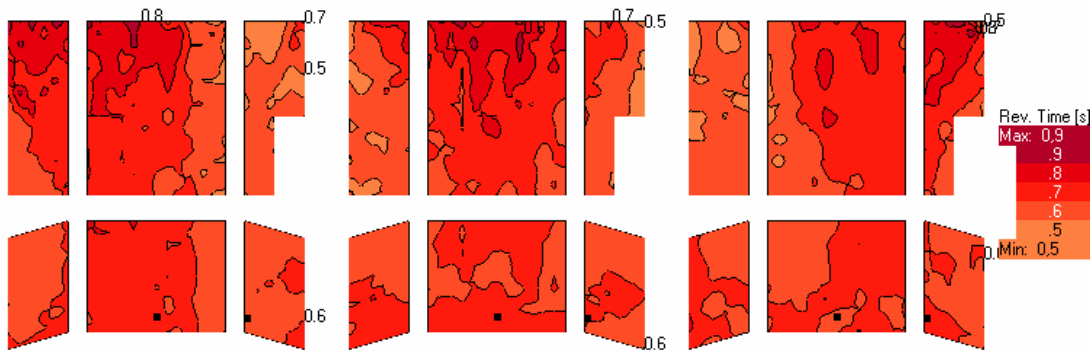


Figura 116. T20 [s] en la banda de octava de 1 kHz para F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha)

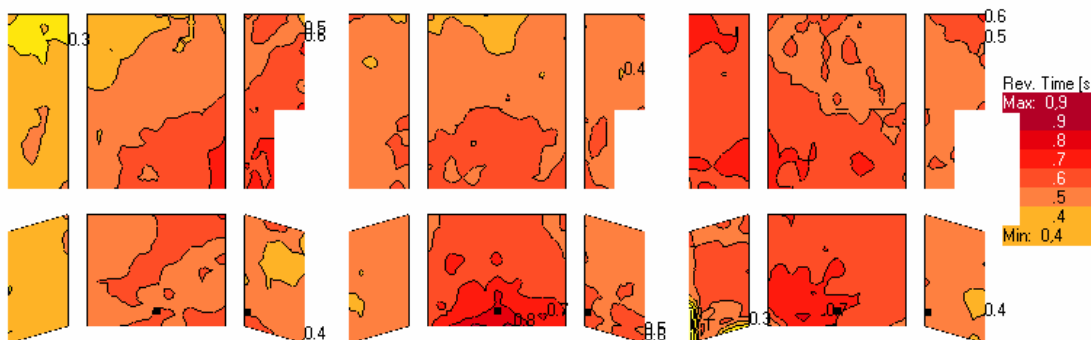


Figura 117. EDT [s] en la banda de octava de 1 kHz para F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha)

Los valores de EDT se reparten de manera contraria, al alejarse de la fuente van disminuyendo. En concreto se presenta un mínimo en la zona trasera de la sala para F1 y F2, y en la zona muy cercana a la fuente para F3.

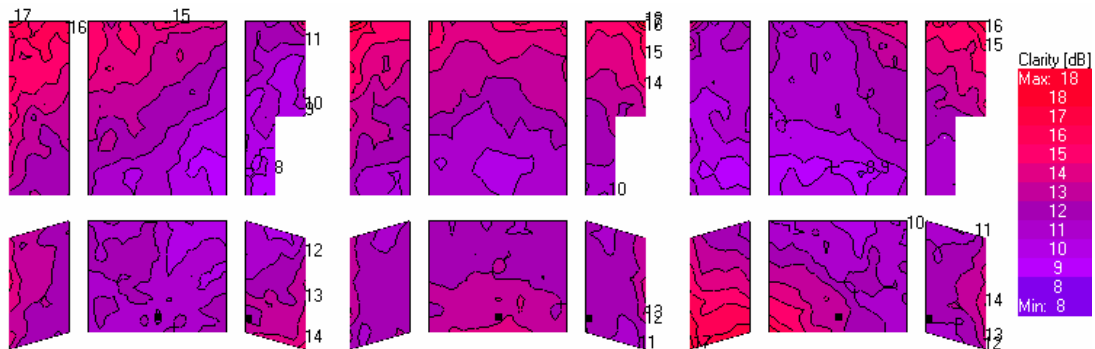


Figura 118. C80 [dB] en la banda de octava de 1 kHz para F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha)

En la Figura 118 y la Figura 119 se muestran los mapas de C80 y D50 para la banda de 1000 Hz. Ambos parámetros tienen un comportamiento similar, toman los valores máximos (18 dB y 97 %) en la fila trasera de la sala y la parte delantera cuando está activa la fuente 3. Los valores más bajos se presentan en la zona central de la sala, pero son superiores a 8 dB y 69 %.

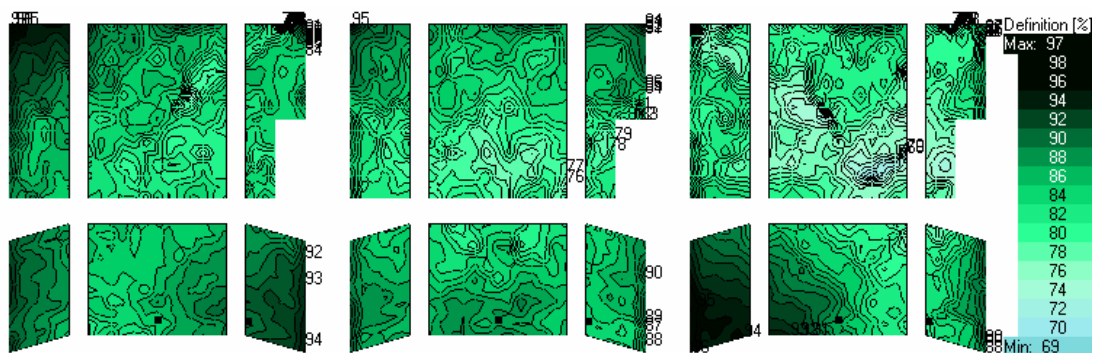


Figura 119. D50 [%] en la banda de octava de 1 kHz para F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha)

Por último se presentan los mapas de LF que son los parámetros con mayor variación pasando de un mínimo de 3 % a un máximo de 25 %. Para F1 y F3, los valores máximos se encuentran en el lateral opuesto al que se encuentra la fuente y los mínimos en la zona cercana a la fuente. En el caso del altavoz en la posición central, la distribución varía ligeramente. Los mínimos se encuentran en la zona central cercana a la fuente y en los asientos pegados a las paredes, esto es debido a

las primeras reflexiones de las paredes. Los valores máximos se encuentran en las zonas intermedias de las salas como se aprecia en la Figura 120

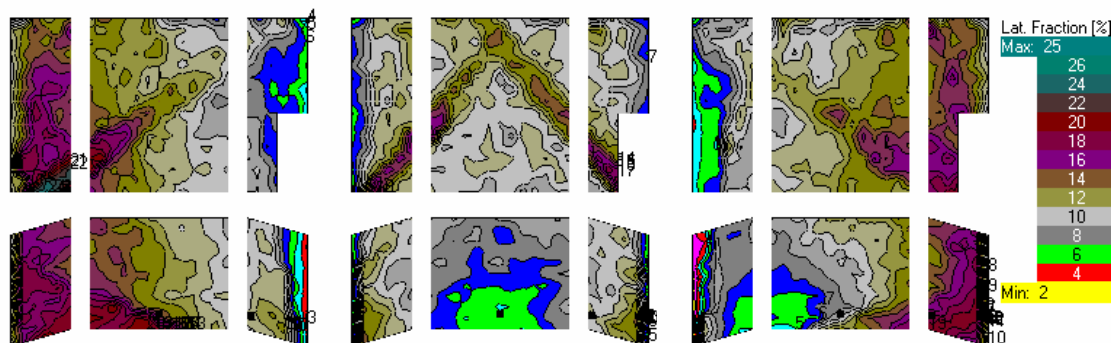


Figura 120. LF [%] en la banda de octava de 1 kHz para F1 (izquierda), F2 (centro) y F3 (derecha)

#### 7.1.4. Distribución en función de la distancia

No se aprecian tendencias claras en función de la distancia ya que las diferencias entre puntos son muy pequeñas, pero se van a comentar algunos aspectos que pueden resultar interesantes.

T20 sólo presenta una ligera tendencia a subir con la distancia en frecuencias baja aumentando en torno a 200 ms de las zonas cercanas a las más alejadas como se muestra en la Figura 121. En cambio, T30 tiende a subir ligeramente en todas las bandas de frecuencia al aumentar la distancia. En la zona de baja frecuencia, la subida es similar a la de T20 y en la zona de frecuencia alta más suave ya que solo existe un ligero aumento (50ms). En la Figura 122 se muestran algunas de la bandas.

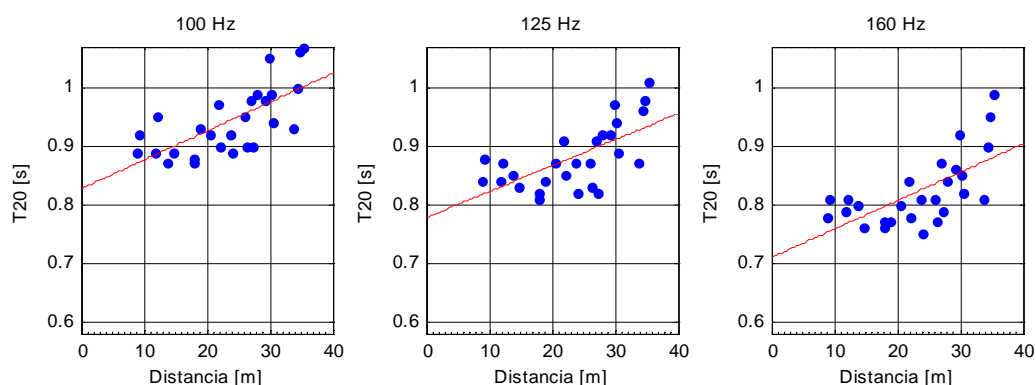


Figura 121. T20 en función de la distancia para frecuencias bajas

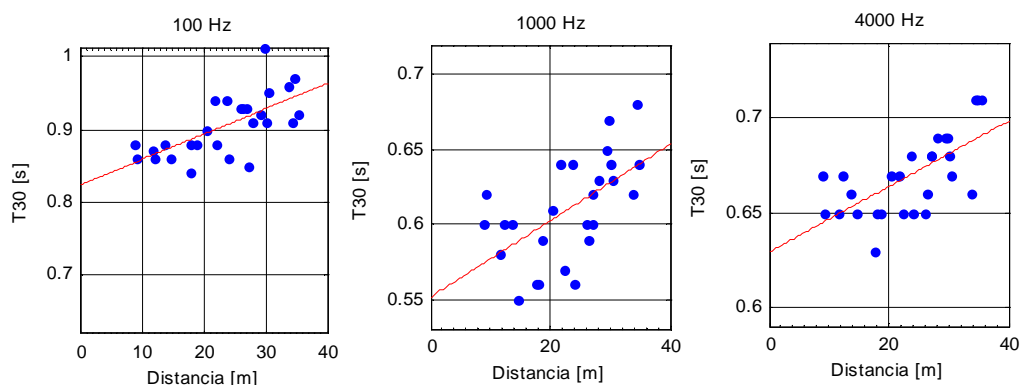


Figura 122. T30 en función de la distancia para distintas frecuencias

Para EDT las diferencias entre los puntos más alejados y más cercanos son de aproximadamente 200 ms para baja frecuencia y 100 ms para alta. Todas las bandas presentan una ligera pendiente de bajada con la distancia, al contrario de lo que ocurría con T30. Esto implica que el ligero aumento de T30 no conlleva una mayor sensación de reverberación de la sala, sino menor.

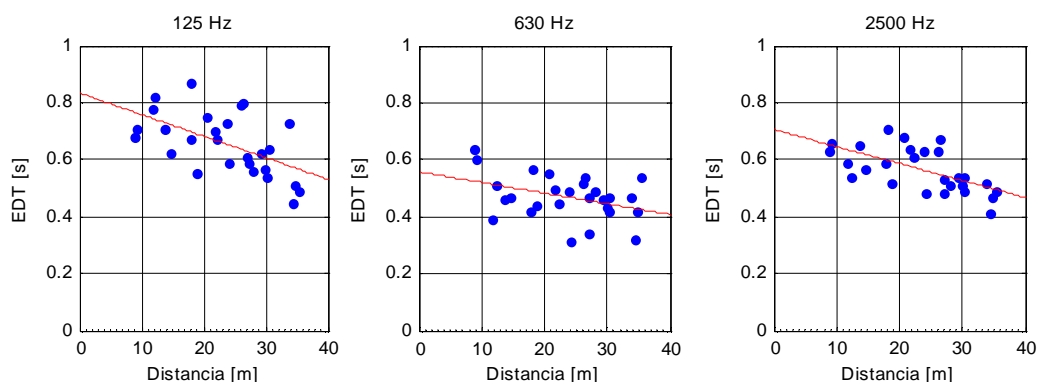


Figura 123. EDT en función de la distancia para distintas frecuencias

C80 disminuye con la distancia en el primer tercio de la sala (de 10 m a 20 m) donde presenta su valor mínimo para todas las bandas y a partir de ese momento se produce un aumento de la Claridad. Por lo tanto, la aproximación al comportamiento de este parámetro sería una parábola como se ve en la Figura 124. Por otra parte, D50 únicamente presenta una ligera disminución en baja frecuencia al aumentar la distancia, aunque los datos son más dispersos.

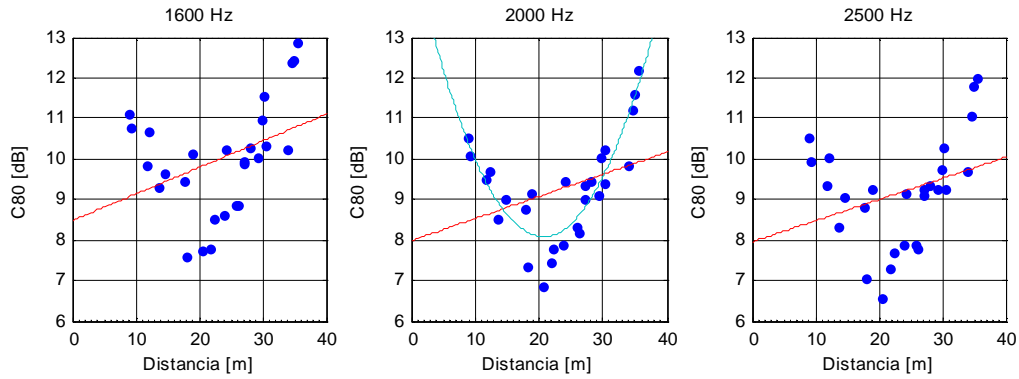


Figura 124. C80 en función de la distancia para distintas frecuencias

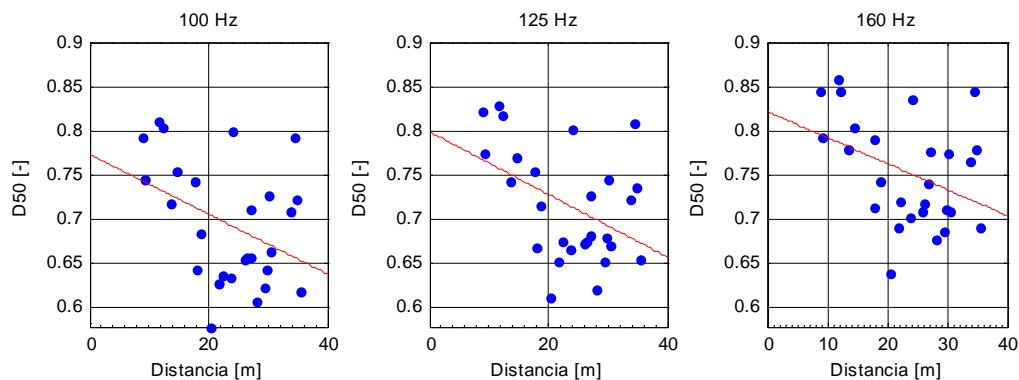


Figura 125. D50 en función de la distancia para distintas frecuencias

El comportamiento de Ts con la distancia también tiene aspecto de parábola con un aumento de la zona más cercana a la intermedia y un descenso desde los 20 m en adelante. La diferencia entre los valores más altos y más bajos es aproximadamente de 20 ms. Se incluyen en la Figura 126 algunas de las bandas de frecuencia.

No se incluye ninguna información de LF porque no presenta cambios que se puedan resaltar. Las diferencias máximas son de 0,1 y los datos dependen en mayor medida de la lateralización de la posición del micrófono respecto a la posición de fuente que de la distancia.

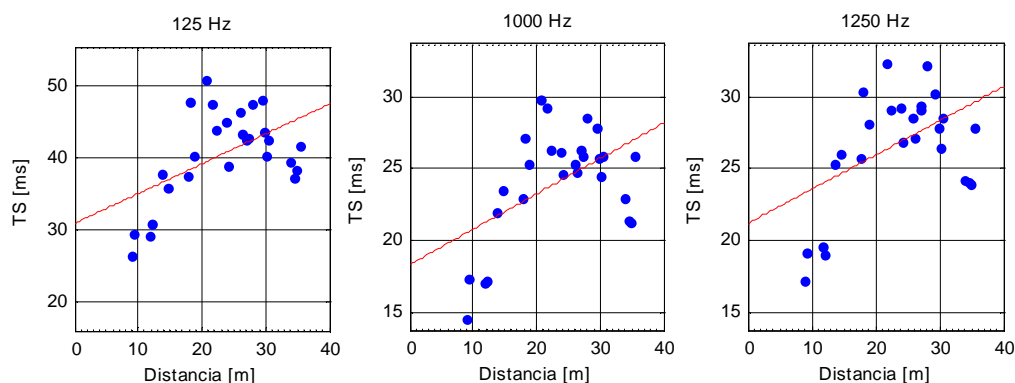


Figura 126. Ts en función de la distancia para distintas frecuencias

### 7.1.5. Valores globales

Los valores globales para esta simulación se incluyen en la Tabla. LX. Tanto T20 como T30 se obtiene un valor en torno a 0,6 s con una desviación bastante baja, una sala de estas características debería tener un RT un poco mayor para obtener una certificación THX. Por otro lado, la reverberación percibida es menor a la real lo que va a implicar que la sala resulte muy seca. Es una sala bien acondicionada para la proyección de películas con unos valores altos de Claridad y Definición y un Tiempo Central bajo. En cuanto a LF, la fuente no se percibe con una anchura excesiva, ya que toda la señal llega desde la zona de la pantalla.

	Valor	$\sigma$
T20 <sub>med</sub> [s]	0,58	0,06
T30 <sub>med</sub> [s]	0,62	0,04
EDT <sub>m</sub> [s]	0,48	0,08
C80 <sub>m</sub> [dB]	11,87	1,60
D50 <sub>m</sub> [-]	0,84	0,04
Ts <sub>m</sub> [ms]	24,17	4,16
LF <sub>m</sub> [-]	0,13	0,04

Tabla. LX. Valores globales para la sala simulados con fuente omnidireccional

## 7.2. Sistema de refuerzo sonoro de la sala

Se van a presentar los resultados de la simulación de la sala con el sistema de refuerzo sonoro. Para que la situación fuera similar a la de las mediciones in situ, se ha ecualizado la sala según la curva X y se ha añadido un retardo de 80 ms a los



altavoces de surround. Este retardo no afectará a los resultados ya que no se excita la sala con todos los altavoces a la vez.

### 7.2.1. Promedios de la sala

Se han realizado los promedios de la sala con todo el sistema de refuerzo sonoro, sólo los altavoces de pantalla y sólo los altavoces de surround ya que existen bastantes diferencias en unos y otros casos.

En la Figura 127, se muestran los valores promedio de T2 Y T30. Como se puede apreciar, existen bastantes diferencias entre los altavoces de pantalla y los altavoces de surround. En primer lugar, los altavoces de surround proporcionan menor tiempo de reverberación que los altavoces de pantalla, al contrario de lo que ocurriría con las mediciones. Las diferencias máximas entre ambas señales son de 180 ms para T20 en la banda de 125 Hz y 120 ms para T30 en la banda de 800 Hz. En la Tabla. LXI y la Tabla. LXII se puede estudiar las desviaciones estándar de ambos parámetros. T20 presenta mayor desviación en sus promedios que T30 superando en todas las bandas los 90 ms. Los datos con mayor desviación se obtienen para los altavoces de pantalla; como se verá en el siguiente apartado las diferencias entre L, C y R son notables.

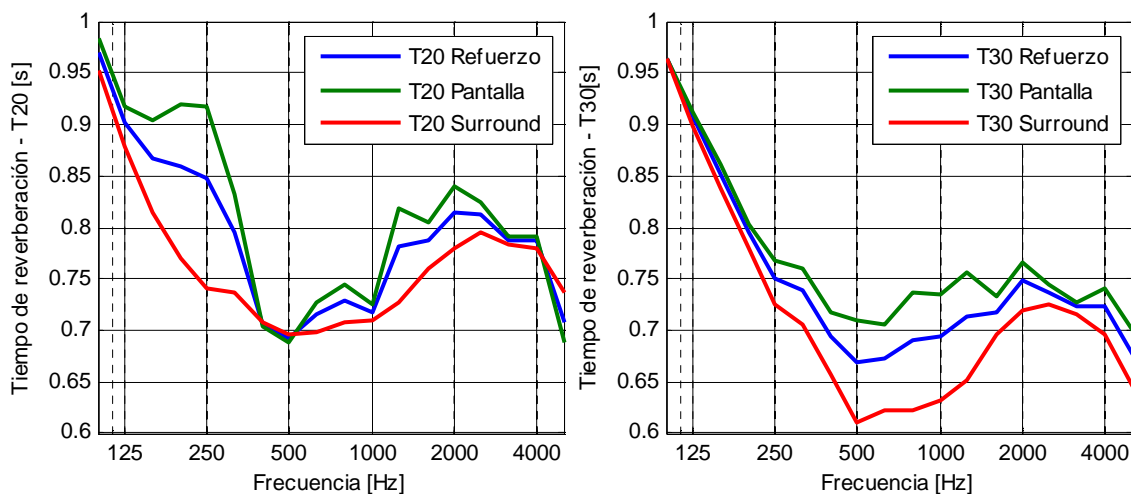


Figura 127. Tiempo de reverberación promedio de la sala simulado con el sistema de refuerzo sonoro

	Sist. Refuerzo		Pantalla		Surround	
FREC.[Hz]	T20 [s]	$\sigma_{T20}$	T20 [s]	$\sigma_{T20}$	T20 [s]	$\sigma_{T20}$
100	0,97	0,12	0,98	0,11	0,95	0,13
125	0,90	0,09	0,92	0,08	0,88	0,11
160	0,87	0,11	0,90	0,11	0,81	0,11
200	0,86	0,17	0,92	0,18	0,77	0,10
250	0,85	0,23	0,92	0,27	0,74	0,11
315	0,79	0,20	0,83	0,24	0,74	0,12
400	0,71	0,21	0,70	0,25	0,71	0,13
500	0,69	0,24	0,69	0,30	0,70	0,14
630	0,72	0,21	0,73	0,26	0,70	0,14
800	0,73	0,21	0,74	0,25	0,71	0,13
1000	0,72	0,20	0,72	0,24	0,71	0,13
1250	0,78	0,22	0,82	0,26	0,73	0,12
1600	0,79	0,18	0,80	0,21	0,76	0,11
2000	0,82	0,19	0,84	0,23	0,78	0,10
2500	0,81	0,18	0,82	0,21	0,79	0,12
3150	0,79	0,19	0,79	0,22	0,78	0,12
4000	0,79	0,19	0,79	0,22	0,78	0,12
5000	0,71	0,17	0,69	0,20	0,74	0,12

Tabla. LXI. Valores de T20 simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces

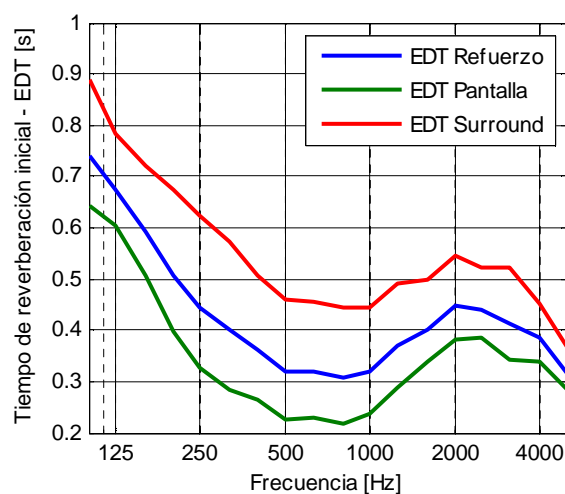


Figura 128. Tiempo de reverberación Inicial – EDT promedio simulado con el sistema de refuerzo sonoro

	Sist. Refuerzo		Pantalla		Surround	
FREC.[Hz]	T30 [s]	$\sigma_{T30}$	T30 [s]	$\sigma_{T30}$	T30 [s]	$\sigma_{T30}$
100	0,96	0,11	0,96	0,10	0,96	0,13
125	0,91	0,10	0,91	0,11	0,90	0,10
160	0,85	0,11	0,86	0,11	0,84	0,11
200	0,79	0,11	0,80	0,13	0,78	0,09
250	0,75	0,09	0,77	0,09	0,73	0,08
315	0,74	0,10	0,76	0,10	0,71	0,08
400	0,69	0,11	0,72	0,12	0,66	0,10
500	0,67	0,15	0,71	0,17	0,61	0,07
630	0,67	0,10	0,71	0,11	0,62	0,07
800	0,69	0,12	0,74	0,13	0,62	0,07
1000	0,69	0,11	0,73	0,12	0,63	0,07
1250	0,71	0,12	0,76	0,12	0,65	0,07
1600	0,72	0,07	0,73	0,07	0,70	0,07
2000	0,75	0,06	0,77	0,06	0,72	0,06
2500	0,74	0,07	0,74	0,08	0,73	0,06
3150	0,72	0,06	0,73	0,06	0,72	0,06
4000	0,72	0,07	0,74	0,07	0,70	0,06
5000	0,68	0,08	0,70	0,08	0,65	0,06

Tabla. LXII. Valores de T30 simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces

EDT varía con la posición del micrófono y por lo tanto presenta una desviación muy alta en todas las combinaciones calculadas, siendo un poco menores para el sistema de pantalla. Con los altavoces de surround se obtienen mayores valores de reverberación percibida, los cuales no están muy alejados del T30 de la sala. En cambio los altavoces de pantalla proporcionan unos valores de EDT muy bajos, ya que sólo las bandas de 100 Hz, 125 Hz y 160 Hz superan los 0,4 s.

	Sist. Refuerzo		Pantalla		Surround	
FREC.[Hz]	EDT [s]	$\sigma_{EDT}$	EDT [s]	$\sigma_{EDT}$	EDT [s]	$\sigma_{EDT}$
100	0.74	0.35	0.64	0.18	0.89	0.48
125	0.68	0.30	0.60	0.17	0.78	0.41
160	0.59	0.29	0.51	0.17	0.72	0.39
200	0.51	0.29	0.40	0.14	0.67	0.37
250	0.44	0.27	0.33	0.11	0.62	0.34
315	0.40	0.26	0.29	0.14	0.57	0.31
400	0.36	0.22	0.26	0.12	0.51	0.27
500	0.32	0.21	0.22	0.11	0.46	0.24
630	0.32	0.21	0.23	0.13	0.45	0.23
800	0.31	0.21	0.22	0.13	0.44	0.23
1000	0.32	0.20	0.24	0.15	0.44	0.21
1250	0.37	0.23	0.29	0.20	0.49	0.24
1600	0.40	0.23	0.34	0.20	0.50	0.24
2000	0.45	0.25	0.38	0.18	0.55	0.29
2500	0.44	0.22	0.39	0.16	0.52	0.28
3150	0.41	0.23	0.34	0.16	0.52	0.28
4000	0.38	0.20	0.34	0.17	0.45	0.22
5000	0.32	0.17	0.28	0.16	0.36	0.18

Tabla. LXIII. Valores de EDT simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces

C80 y D50 toma valores muy altos en todas las combinaciones calculadas, esto es un claro síntoma de la buena inteligibilidad y nitidez. Son mayores los valores obtenidos con los altavoces de pantalla obteniéndose C80 superior a 9 dB y D50 superior a 0,8 y las desviaciones son menores (inferiores a 3 dB y 0,05 respectivamente). Para D50 las diferencias entre los altavoces de surround y pantalla son aproximadamente de 0,1 en todas las bandas y para C80 varía entre 2 dB y 5 dB. Para ambos parámetros se puede apreciar que el máximo se encuentra en frecuencias medias (800 Hz). En la Figura 129, la Tabla. LXIV y la Tabla. LXV se presentan estos resultados.

	Sist. Refuerzo		Pantalla		Surround	
FREC.[Hz]	C80 [dB]	$\sigma_{C80}$	C80 [dB]	$\sigma_{C80}$	C80 [dB]	$\sigma_{C80}$
100	8,39	2,65	9,25	1,25	7,09	3,59
125	8,99	2,44	9,69	1,14	7,95	3,39
160	10,31	2,83	11,43	1,50	8,63	3,50
200	11,48	3,11	12,86	1,68	9,41	3,64
250	12,61	3,28	14,25	1,61	10,15	3,62
315	13,43	3,63	15,26	2,32	10,68	3,54
400	14,12	3,79	16,10	2,52	11,14	3,45
500	14,63	3,77	16,69	2,49	11,55	3,25
630	14,47	3,63	16,46	2,40	11,48	3,10
800	14,95	3,86	17,11	2,50	11,70	3,23
1000	14,43	3,58	16,37	2,42	11,53	3,04
1250	13,73	3,54	15,43	2,64	11,18	3,21
1600	13,01	3,32	14,57	2,66	10,68	2,83
2000	12,52	3,19	13,73	2,55	10,71	3,27
2500	12,35	2,99	13,48	2,57	10,66	2,83
3150	12,46	3,07	13,79	2,69	10,47	2,51
4000	12,64	2,86	14,01	2,45	10,59	2,14
5000	13,65	2,83	15,17	2,26	11,37	1,94

Tabla. LXIV. Valores de C80 simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces

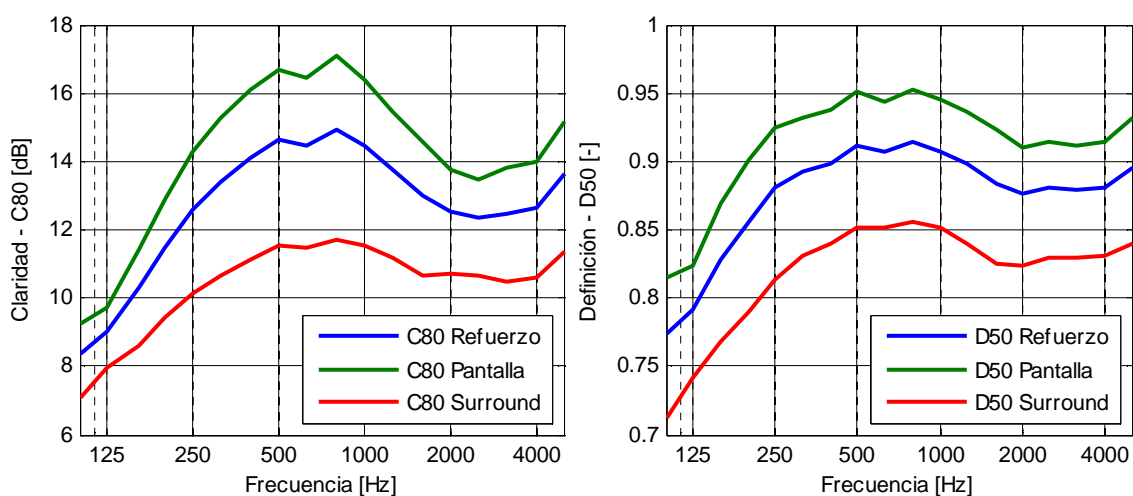


Figura 129. Claridad [dB] y Definición [-] promedio de la sala simulado con el sistema de refuerzo sonoro

	Sist. Refuerzo		Pantalla		Surround	
FREC.[Hz]	D50 [-]	$\sigma_{D50}$	D50 [-]	$\sigma_{D50}$	D50 [-]	$\sigma_{D50}$
100	0,77	0,11	0,81	0,05	0,71	0,15
125	0,79	0,10	0,82	0,05	0,74	0,13
160	0,83	0,10	0,87	0,04	0,77	0,12
200	0,86	0,09	0,90	0,03	0,79	0,11
250	0,88	0,09	0,92	0,03	0,81	0,11
315	0,89	0,08	0,93	0,03	0,83	0,10
400	0,90	0,08	0,94	0,02	0,84	0,10
500	0,91	0,08	0,95	0,02	0,85	0,09
630	0,91	0,07	0,94	0,02	0,85	0,09
800	0,91	0,08	0,95	0,02	0,86	0,09
1000	0,91	0,07	0,94	0,03	0,85	0,09
1250	0,90	0,08	0,94	0,03	0,84	0,09
1600	0,88	0,08	0,92	0,03	0,83	0,10
2000	0,88	0,08	0,91	0,04	0,82	0,11
2500	0,88	0,08	0,91	0,03	0,83	0,11
3150	0,88	0,08	0,91	0,03	0,83	0,10
4000	0,88	0,08	0,91	0,03	0,83	0,11
5000	0,90	0,09	0,93	0,03	0,84	0,12

Tabla. LXV. Valores de D50 simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces

El tiempo central presenta diferencias perceptibles entre unos y otros altavoces. En este caso, la respuesta impulsiva de los altavoces de surround presenta un valor de  $T_s$  entre 15 ms y 18 ms superior a los altavoces de pantalla, pero también la desviación es mucho mayor (15 ms). Los altavoces de pantalla presentan unos valores muy bajos (10 ms) especialmente en la zona de frecuencias media y las desviaciones estándar son menores a 5 ms.

	Sist. Refuerzo		Pantalla		Surround	
FREC.[Hz]	TS [ms]	$\sigma_{TS}$	TS [ms]	$\sigma_{TS}$	TS [ms]	$\sigma_{TS}$
100	36,78	15,84	29,60	4,10	47,57	20,46
125	33,43	13,98	27,20	3,97	42,77	18,10
160	28,25	14,04	21,16	3,19	38,89	17,18
200	24,60	13,83	17,30	2,95	35,55	16,44
250	21,56	13,21	14,40	2,67	32,29	15,41
315	19,65	12,93	12,55	3,07	30,29	14,78
400	18,32	12,52	11,32	2,58	28,82	14,17
500	16,94	12,24	9,87	2,24	27,53	13,49
630	17,28	12,20	10,33	2,32	27,71	13,59
800	16,59	12,53	9,57	2,57	27,13	14,14
1000	16,91	12,43	9,79	2,51	27,58	13,76
1250	18,39	12,59	11,40	2,72	28,88	14,32
1600	19,98	12,70	12,92	2,89	30,57	14,37
2000	21,12	12,93	14,61	3,00	30,89	15,83
2500	20,80	12,35	14,54	2,25	30,20	15,21
3150	20,47	12,13	14,20	2,49	29,88	14,68
4000	20,21	11,68	14,00	2,60	29,51	13,77
5000	17,97	11,48	11,65	2,18	27,46	13,22

Tabla. LXVI. Valores de Ts simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces

LF presenta mayores valores en los altavoces de surround ya que se está excitando la sala desde un lateral y menores valores para los altavoces de pantalla. Las desviaciones obtenidas para el conjunto del sistema de refuerzo sonoro y para los altavoces de surround son altas y comparables al valor de los promedios. Ocurre lo mismo con los altavoces de pantalla ya que el los promedios son inferiores a 0,1 y las desviaciones están en torno a 0,4.

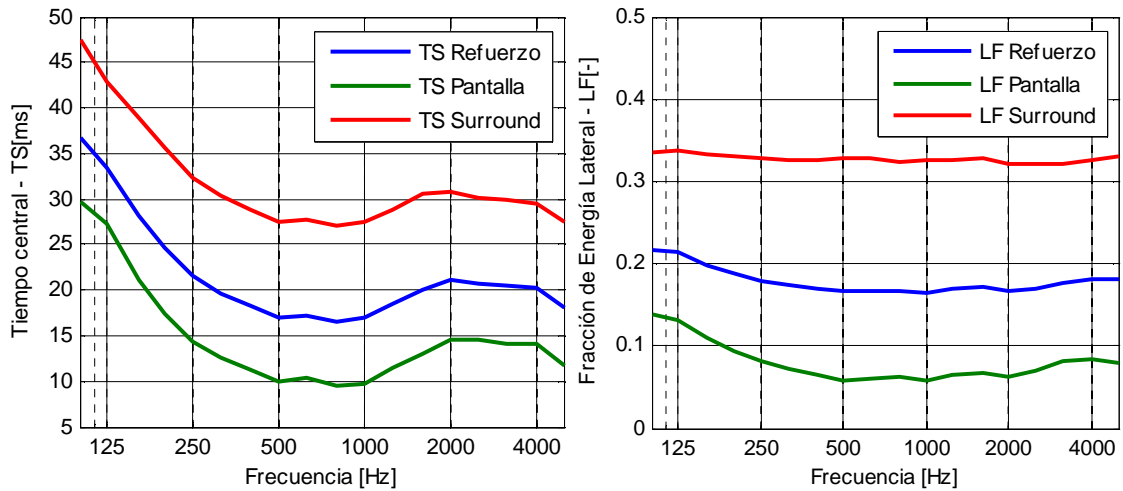


Figura 130. Tiempo Central [ms] y Fracción de Energía Lateral [-] promedio de la sala simulado con el sistema de refuerzo sonoro

	Sist. Refuerzo		Pantalla		Surround	
FREC.[Hz]	LF [-]	$\sigma_{LF}$	LF [-]	$\sigma_{LF}$	LF [-]	$\sigma_{LF}$
100	0,22	0,16	0,14	0,04	0,33	0,19
125	0,21	0,16	0,13	0,04	0,34	0,20
160	0,20	0,17	0,11	0,04	0,33	0,20
200	0,19	0,17	0,09	0,04	0,33	0,20
250	0,18	0,18	0,08	0,04	0,33	0,20
315	0,17	0,18	0,07	0,04	0,33	0,20
400	0,17	0,18	0,07	0,03	0,33	0,21
500	0,17	0,19	0,06	0,03	0,33	0,21
630	0,17	0,19	0,06	0,04	0,33	0,22
800	0,17	0,19	0,06	0,03	0,32	0,22
1000	0,17	0,19	0,06	0,03	0,33	0,22
1250	0,17	0,19	0,06	0,03	0,33	0,22
1600	0,17	0,19	0,07	0,03	0,33	0,21
2000	0,17	0,19	0,06	0,03	0,32	0,22
2500	0,17	0,19	0,07	0,03	0,32	0,23
3150	0,18	0,20	0,08	0,03	0,32	0,25
4000	0,18	0,20	0,09	0,04	0,33	0,25
5000	0,18	0,20	0,08	0,04	0,33	0,25

Tabla. LXVII. Valores de LF simulados con el sistema de refuerzo sonoro para distintas combinaciones de altavoces



### 7.2.2. Promedios por posición de fuente

Un promediado por posición de fuente permite ver porque se han obtenido desviaciones grandes en algunos de los parámetros como, por ejemplo, T20. Si se observa la Figura 131 se ven que los resultados para los dos conjuntos de altavoces de surround son prácticamente iguales, pero con los altavoces de pantalla se obtienen valores muy distintos para T20. Con el altavoz derecho se han conseguido valores mucho mayores que para el central o el izquierdo a partir de 400 Hz. Para T30 los tres canales de pantalla presentan valores similares.

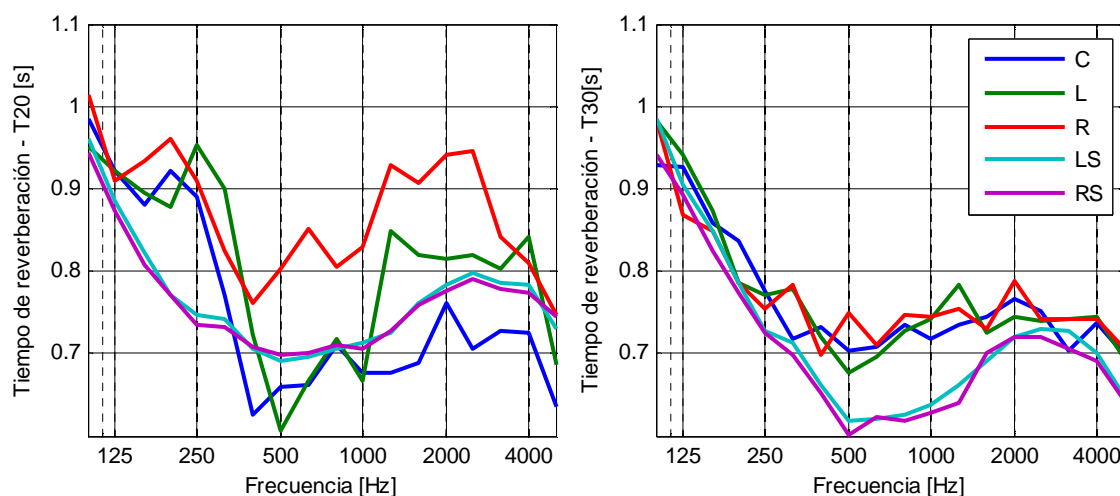


Figura 131. T20 y T30 promedio simulado por posición de fuente

EDT también presenta valores similares para los tres canales de pantalla como se ve en la Figura 132. Los promedios de los canales de surround toman valores más altos que los de pantalla y ligeramente superior (en torno a 100 ms) SR a SL.

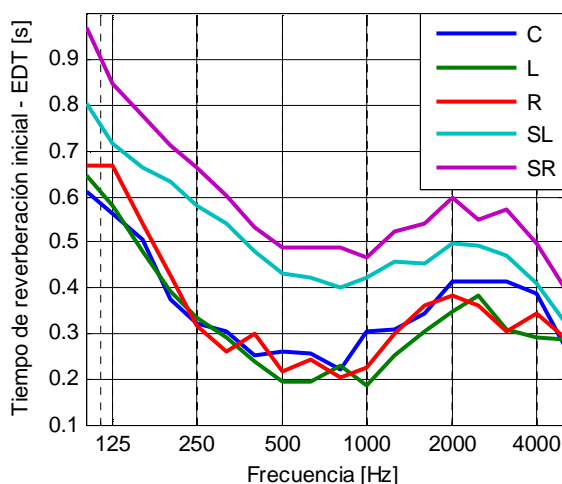


Figura 132. EDT promedio simulado por posición de fuente

Para el resto de parámetros (C80, D50, Ts y LF) los tres altavoces de pantalla muestran promedios similares con ligeras diferencias entre ellos como se observa en la Figura 133 y la Figura 134. Los altavoces de surround tienen un comportamiento similar en frecuencia pero presentan diferencias de aproximadamente 1 dB para C80, 0,05 para D50, 5 ms para Ts y entre 0,03 y 0,05 para LF. C80 y D50 toma los valores máximos con la excitación de los canales de pantalla y los mínimos con el de surround derecho. Ocurre lo contrario con Ts; los altavoces de pantalla toman valores inferiores a 30 ms en todas las bandas, mientras que los de surround superan los 25 ms. Por último, LF toma valores superiores con la excitación con los altavoces de surround como es lógico, ya que se presenta una excitación desde el lateral de la sala.

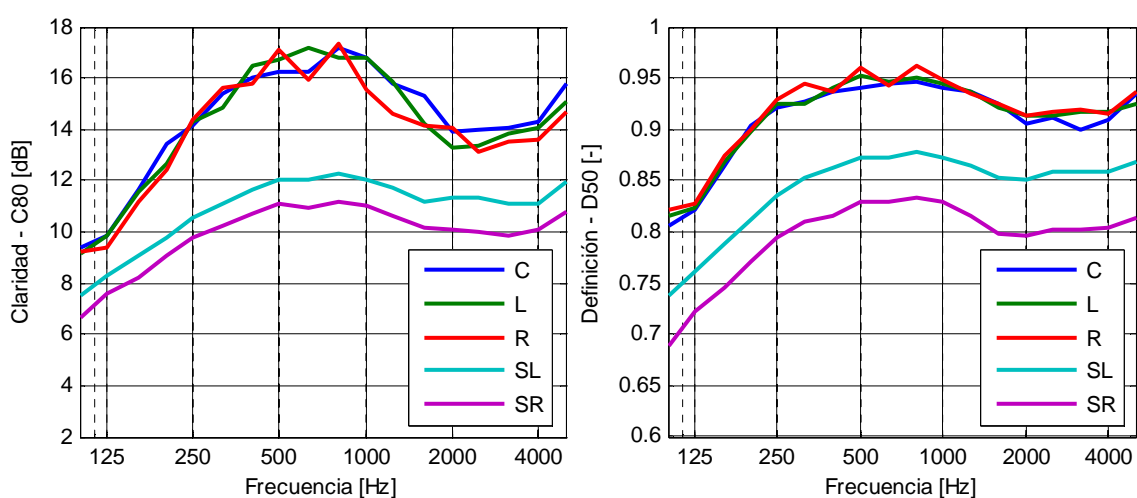


Figura 133. Claridad y Definición simulado por posición de fuente

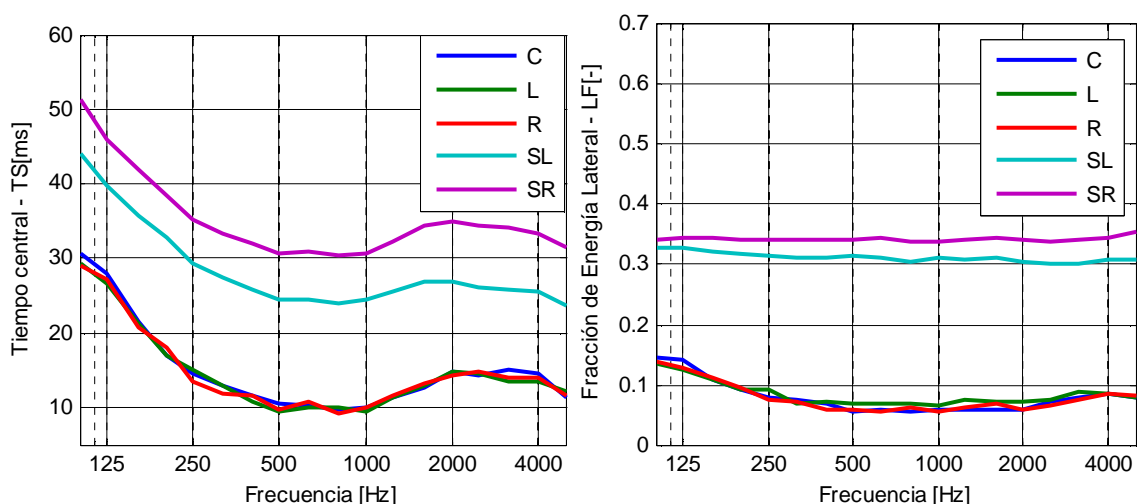


Figura 134. TS y LF promedio simulado por posición de fuente

### 7.2.3. Promedios por zonas

Para las distintas posiciones de micrófono T20 presenta diferencias muy grandes como se ve en Tabla. LXVIII y la Figura 135. Estas diferencias también son altas entre bandas de frecuencia para una misma posición. En las posiciones M7 y M8, situadas a la izquierda de la sala y en una zona muy alejada de la pantalla, se obtienen los valores mayores de T20 para la zona de baja y media frecuencia. Si se analiza la gráfica correspondiente a los altavoces de surround, las curvas son más suaves, pero las diferencias alcanzan los 400 ms entre posiciones en media frecuencia. Las posiciones con menor T20 son las tres posiciones delanteras de la sala (M1, M2 y M3), y va aumentando al alejarse de la pantalla. Además, los puntos M1 y M3 y los puntos M5 y M3 tienen valores casi iguales para los altavoces de surround.

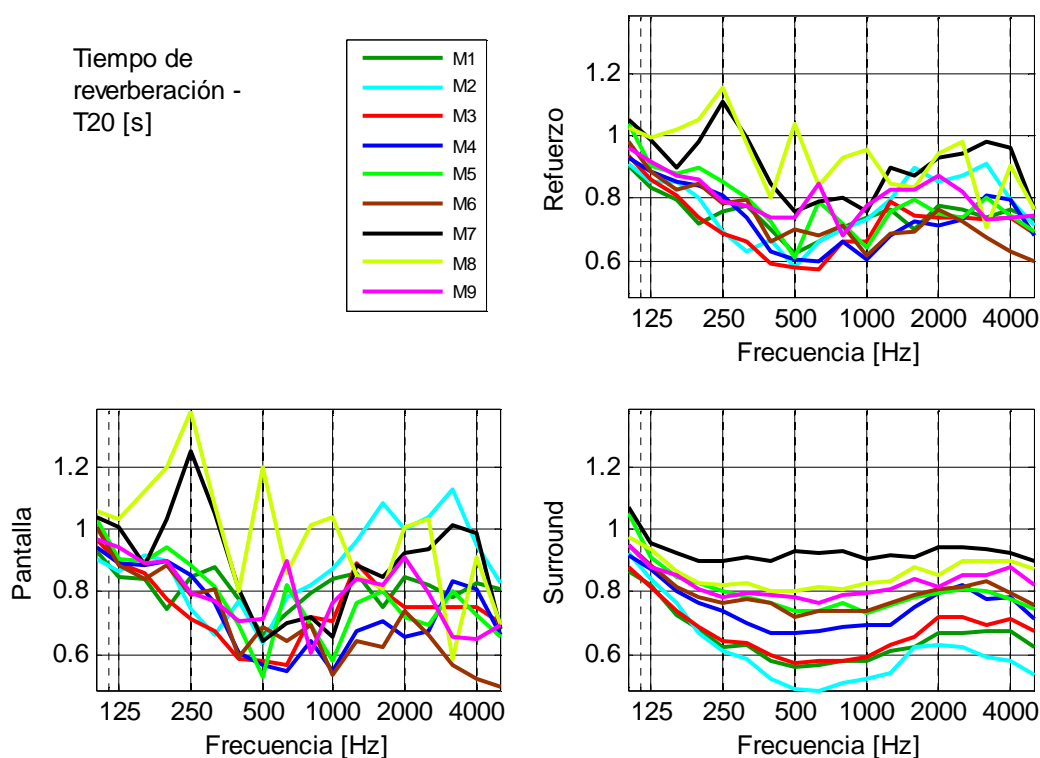


Figura 135. T20 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

T20 [s]	Sist. Refuerzo			Pantalla			Surround		
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
M1	0,80	0,70	0,75	0,85	0,78	0,81	0,72	0,58	0,65
M2	0,79	0,69	0,84	0,83	0,81	1,00	0,73	0,51	0,60
M3	0,78	0,64	0,73	0,81	0,67	0,75	0,73	0,59	0,70
M4	0,84	0,63	0,74	0,87	0,60	0,72	0,80	0,68	0,77
M5	0,89	0,71	0,75	0,91	0,68	0,73	0,87	0,75	0,78
M6	0,85	0,68	0,68	0,87	0,63	0,60	0,83	0,74	0,80
M7	1,00	0,81	0,91	1,04	0,73	0,90	0,94	0,92	0,93
M8	1,04	0,90	0,86	1,14	0,96	0,84	0,88	0,82	0,88
M9	0,86	0,77	0,79	0,88	0,75	0,75	0,84	0,79	0,84

Tabla. LXVIII. T20 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

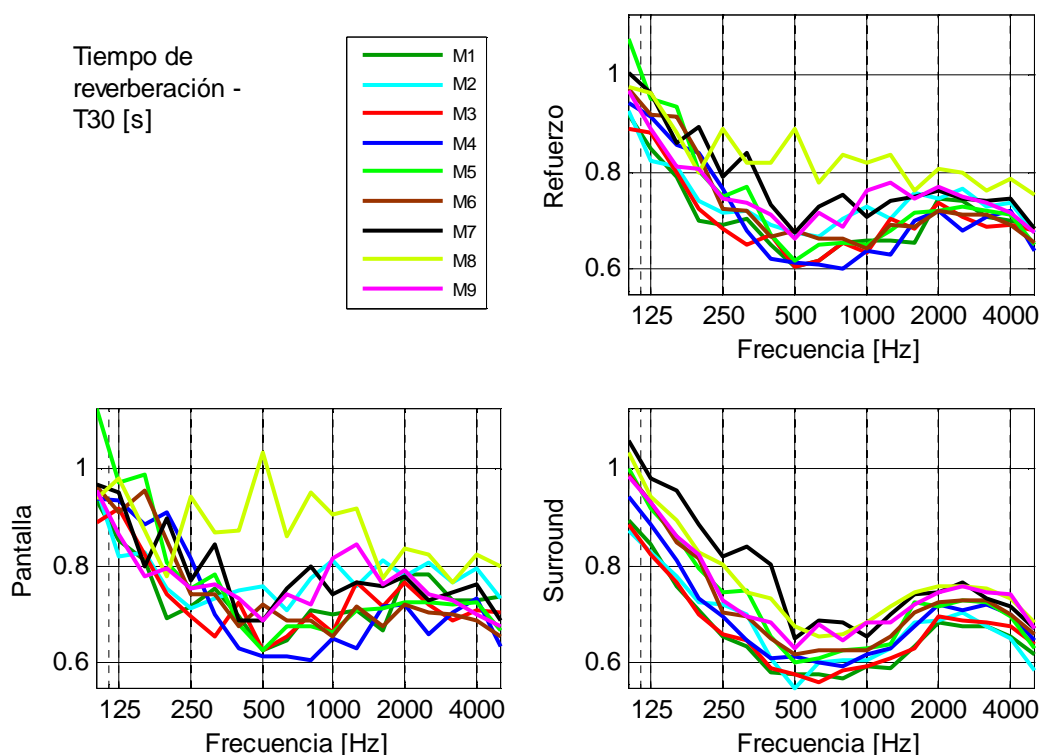


Figura 136. T30 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

T30 presenta menores diferencias entre posiciones que T20 para todas las combinaciones de altavoces. Las 4 primeras posiciones toman valores similares e inferiores al resto de posiciones para el conjunto de altavoces de surround donde la posición 7 presenta los valores más alta como se ve en la Tabla. LXIX. Las diferencias

máximas alcanzan los 110 ms en frecuencias medias por lo tanto serían perceptibles (aproximadamente equivalen a 4 JND). Para el promedio realizado con los altavoces de pantalla el punto M8 presenta unos valores excesivamente altos y muy diferentes al resto de posiciones en frecuencias medias. Las diferencias máximas se encuentran entre 90 ms y 120 ms si no se tiene en cuenta la posición M8.

<b>T30 [s]</b>	<b>Sist. Refuerzo</b>			<b>Pantalla</b>			<b>Surround</b>		
<b>FREC.[Hz]</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>
M1	0,78	0,64	0,71	0,79	0,68	0,74	0,75	0,58	0,66
M2	0,79	0,70	0,74	0,80	0,76	0,78	0,77	0,60	0,67
M3	0,77	0,65	0,70	0,79	0,69	0,72	0,75	0,59	0,67
M4	0,83	0,62	0,69	0,87	0,62	0,69	0,79	0,61	0,70
M5	0,88	0,65	0,71	0,91	0,67	0,71	0,85	0,63	0,70
M6	0,85	0,67	0,70	0,86	0,69	0,69	0,83	0,63	0,71
M7	0,89	0,72	0,74	0,87	0,74	0,74	0,92	0,70	0,73
M8	0,89	0,83	0,78	0,90	0,92	0,80	0,88	0,69	0,74
M9	0,83	0,72	0,73	0,82	0,76	0,73	0,84	0,67	0,73

Tabla. LXIX. T30 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

<b>EDT [s]</b>	<b>Sist. Refuerzo</b>			<b>Pantalla</b>			<b>Surround</b>		
<b>FREC.[Hz]</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>
M1	0,56	0,34	0,46	0,48	0,15	0,33	0,69	0,63	0,65
M2	0,57	0,30	0,43	0,36	0,07	0,21	0,88	0,64	0,75
M3	0,60	0,36	0,45	0,55	0,22	0,40	0,68	0,58	0,52
M4	0,55	0,35	0,36	0,50	0,35	0,37	0,62	0,35	0,34
M5	0,61	0,36	0,50	0,55	0,37	0,50	0,70	0,34	0,50
M6	0,57	0,33	0,37	0,47	0,31	0,38	0,71	0,36	0,34
M7	0,48	0,29	0,34	0,41	0,27	0,33	0,57	0,31	0,34
M8	0,56	0,31	0,36	0,38	0,18	0,25	0,82	0,51	0,51
M9	0,55	0,35	0,36	0,44	0,27	0,32	0,73	0,48	0,40

Tabla. LXX. EDT para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

Los datos relativos a EDT se incluyen en la Tabla. LXX y la Figura 137. Las diferencias claras entre los altavoces de pantalla y los de surround se ven de nuevo en los promedios punto a punto. En todos los casos los valores para los altavoces de

pantalla son mucho menores que para los de surround. Cabe destacar los datos de la posición M2 que presenta los valores más bajos en un caso y los más altos en otro. Los puntos M8 y M9, aún estando muy alejados y en posiciones laterales, proporcionan resultados similares y con un valor intermedio.

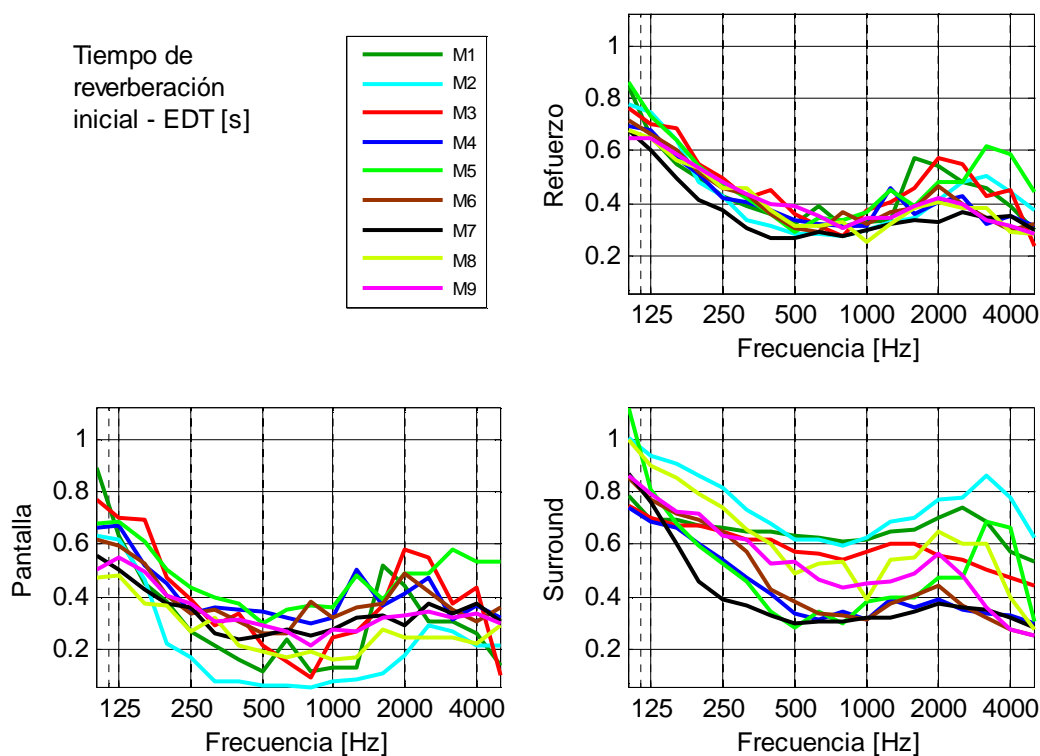


Figura 137. EDT para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

C80 presenta unas curvas suaves y sin cambios bruscos entre bandas adyacentes excitando la sala con los altavoces de surround. Para todas las posiciones, excepto M2 que presenta un mínimo, las diferencias entre los valores máximos (M8) y los valores mínimos (M1) no superan los 3 dB. Los promedios realizados con los altavoces de pantalla por posiciones muestran diferencias superiores (hasta 6 dB), además de ser más irregulares como se ve en la Figura 138. Exceptuando el punto M2, los puntos con menor o mayor valor de este parámetro se repite para todas las combinaciones de altavoces.

C80 [dB]	Sist. Refuerzo			Pantalla			Surround		
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
M1	10,13	12,94	11,23	11,42	14,44	12,13	8,20	10,69	9,88
M2	10,19	14,04	11,26	13,30	17,96	13,57	5,52	8,16	7,79
M3	9,87	13,29	11,45	10,67	14,61	12,03	8,67	11,31	10,56
M4	10,28	13,36	12,05	10,85	14,35	12,45	9,44	11,87	11,45
M5	10,00	13,38	11,65	10,68	14,91	12,27	8,98	11,08	10,73
M6	11,22	14,89	13,68	12,34	16,68	15,00	9,53	12,20	11,69
M7	11,73	15,73	14,07	12,80	18,10	15,96	10,13	12,18	11,23
M8	12,54	16,71	15,62	13,94	19,21	18,20	10,45	12,97	11,75
M9	11,86	15,15	13,95	13,13	16,98	15,51	9,94	12,39	11,62

Tabla. LXXI. C80 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

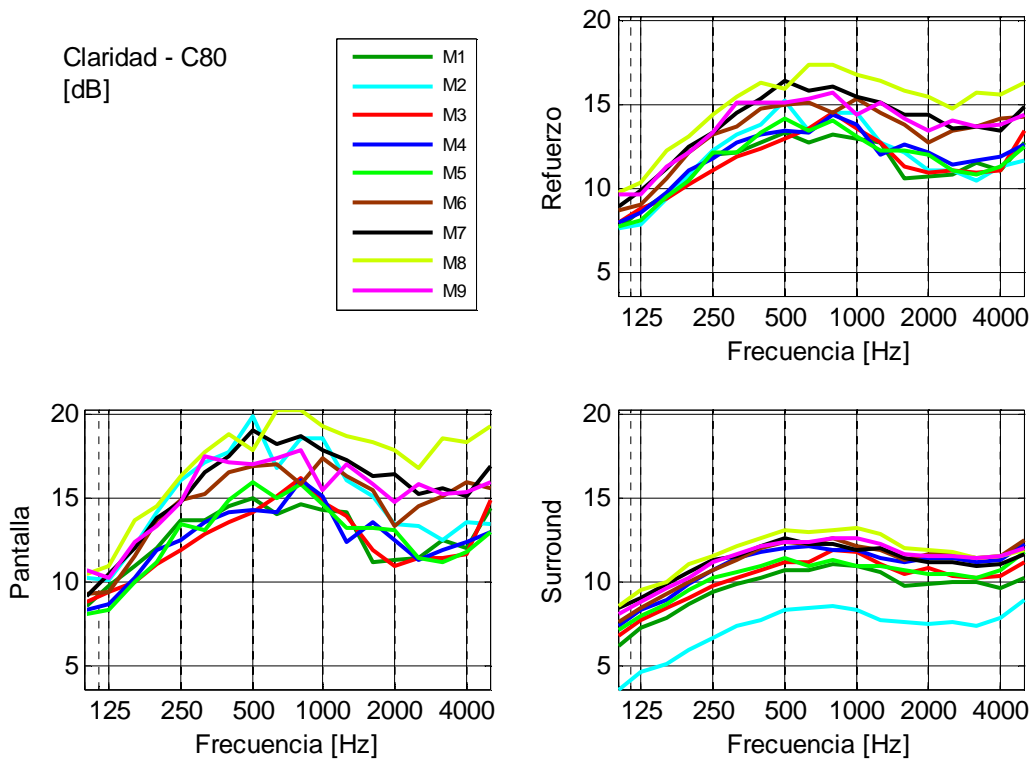


Figura 138. C80 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

D50 presenta el mismo comportamiento y valores similares para todos los puntos excitando la sala con los altavoces de pantalla. Si se observan los promedios por bandas (ver Tabla. LXXII), no existen diferencias perceptibles entre posiciones. Si se mira la gráfica correspondiente a los altavoces de surround (Figura 139), M1, M2,

M3 y M8 presentan unos valores más bajos que los del resto de posiciones pero similares entre sí en medias frecuencias. Los puntos con mayor valor de Definición son los puntos M4 y M5 que están situados en la parte central de la sala.

D50 [-]	Sist. Refuerzo			Pantalla			Surround		
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
M1	0,83	0,89	0,86	0,89	0,95	0,91	0,73	0,80	0,77
M2	0,81	0,90	0,88	0,91	0,97	0,93	0,67	0,81	0,80
M3	0,82	0,89	0,84	0,87	0,94	0,91	0,74	0,81	0,75
M4	0,85	0,92	0,91	0,87	0,93	0,91	0,83	0,90	0,89
M5	0,84	0,92	0,89	0,85	0,93	0,90	0,84	0,90	0,89
M6	0,84	0,90	0,88	0,86	0,92	0,89	0,81	0,88	0,86
M7	0,86	0,92	0,90	0,88	0,95	0,93	0,82	0,87	0,86
M8	0,84	0,90	0,89	0,89	0,96	0,95	0,75	0,80	0,80
M9	0,84	0,91	0,89	0,87	0,94	0,93	0,80	0,86	0,85

Tabla. LXXII. D50 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

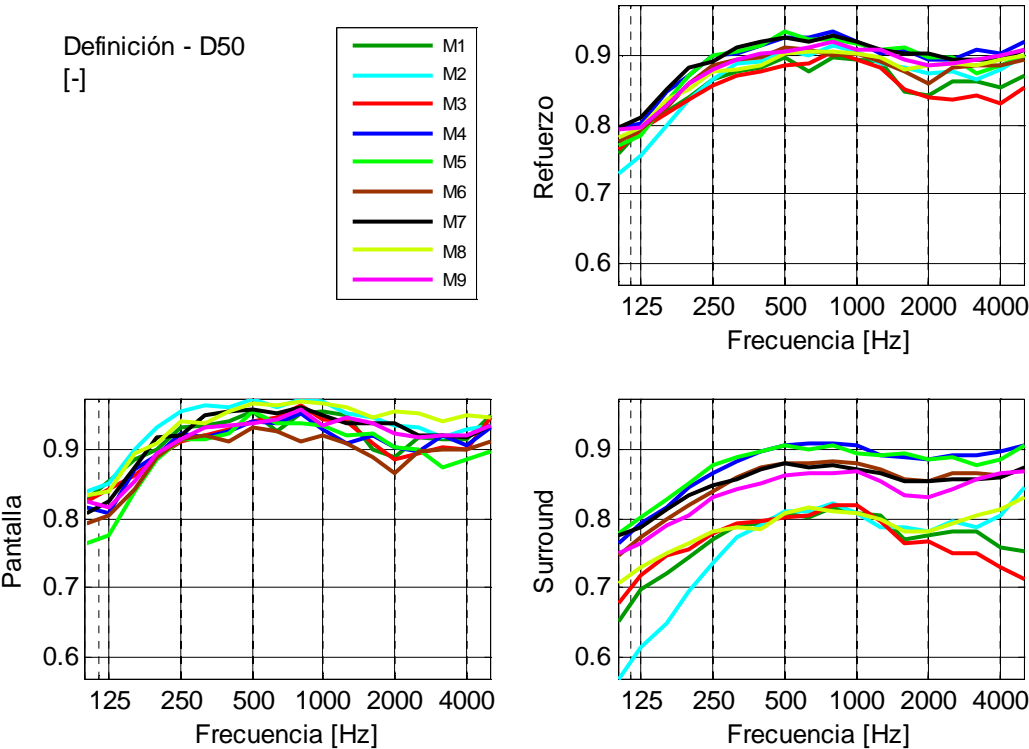


Figura 139. D50 para distintas posiciones y combinaciones de altavoces



No hay diferencias superiores a 1 JND (10 ms) entre las distintas posiciones de la sala para el conjunto de altavoces de pantalla como se observa en la Figura 140. Y son inferiores a 2 JND para el sistema de surround excepto en las bandas de 100 Hz y 125 Hz. Los valores mínimos los presentan los puntos M2 (para altavoces de pantalla) y M5 (para surround).

Ts [ms]	Sist. Refuerzo			Pantalla			Surround		
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
M1	25,51	15,80	19,51	18,21	9,31	13,70	36,47	25,53	28,22
M2	28,70	17,13	20,37	15,72	6,52	12,00	48,16	33,05	32,93
M3	25,66	15,49	19,86	20,17	9,95	14,39	33,90	23,81	28,05
M4	27,84	17,95	19,75	22,63	12,68	14,76	35,67	25,87	27,23
M5	25,72	14,21	16,62	23,16	10,69	14,56	29,55	19,49	19,70
M6	28,55	19,13	20,83	21,35	12,21	14,08	39,37	29,50	30,95
M7	26,55	17,47	20,33	21,35	10,66	13,62	34,36	27,69	30,39
M8	29,04	19,68	21,70	19,95	10,07	12,12	42,67	34,10	36,07
M9	28,82	19,78	21,88	20,79	11,34	13,65	40,88	32,44	34,23

Tabla. LXXIII. TS para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

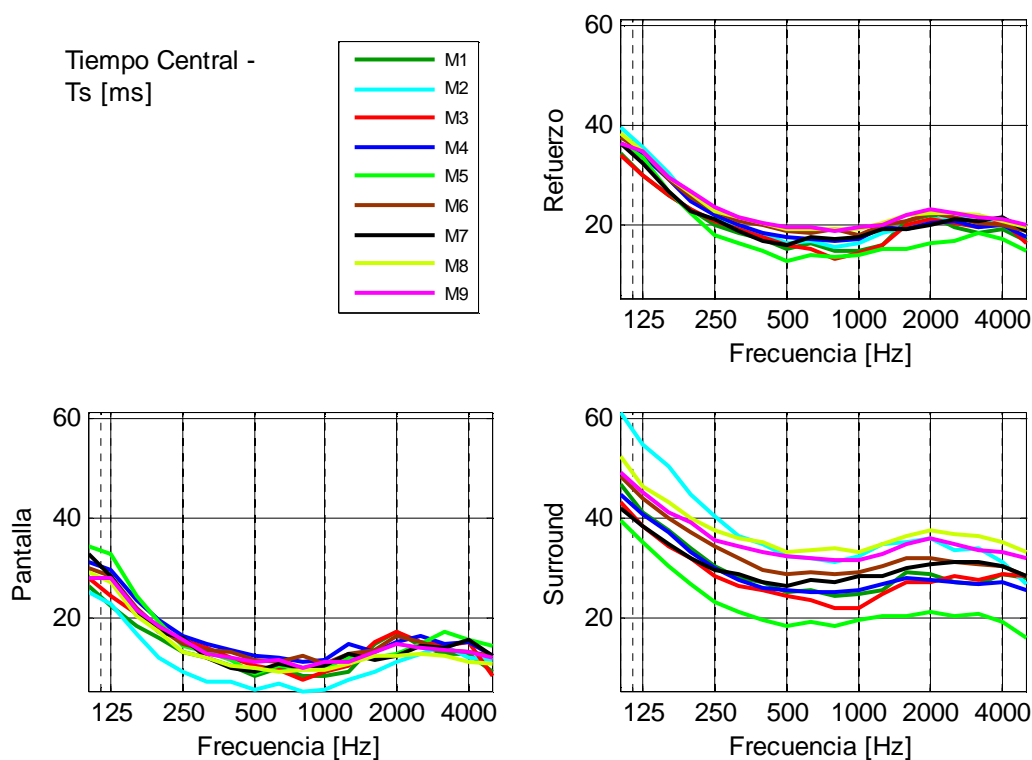


Figura 140. TS para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

LF [-]	Sist. Refuerzo			Pantalla			Surround		
FREC.[Hz]	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
M1	0,16	0,13	0,14	0,09	0,05	0,06	0,26	0,26	0,24
M2	0,14	0,09	0,09	0,09	0,04	0,06	0,21	0,18	0,15
M3	0,17	0,14	0,14	0,11	0,07	0,08	0,25	0,23	0,24
M4	0,22	0,20	0,21	0,11	0,07	0,08	0,39	0,40	0,40
M5	0,17	0,12	0,12	0,09	0,04	0,06	0,29	0,25	0,22
M6	0,21	0,20	0,20	0,10	0,06	0,07	0,39	0,40	0,40
M7	0,22	0,21	0,23	0,09	0,05	0,06	0,42	0,45	0,49
M8	0,23	0,20	0,21	0,13	0,09	0,10	0,38	0,37	0,38
M9	0,23	0,21	0,22	0,13	0,09	0,09	0,39	0,40	0,42

Tabla. LXXIV. LF para distintas posiciones y combinaciones de altavoces

En la Figura 141, se aprecia que no existen diferencias entre posiciones cuando se analizan los datos de LF para los altavoces de pantalla, es decir, el ancho aparente de la fuente no varia. En cambio, con los altavoces de surround hay muchas diferencias. El punto central delantero (M2) es el de menor LF y los puntos laterales delanteros (M1 y M3) tienen el mismo valor que el punto dulce (M5). Esto se debe a que se compensan los valores de LS y RS. Las cuatro posiciones laterales traseras (M4, M6, M8 y M9) toman valores mayores en torno a 0,4.

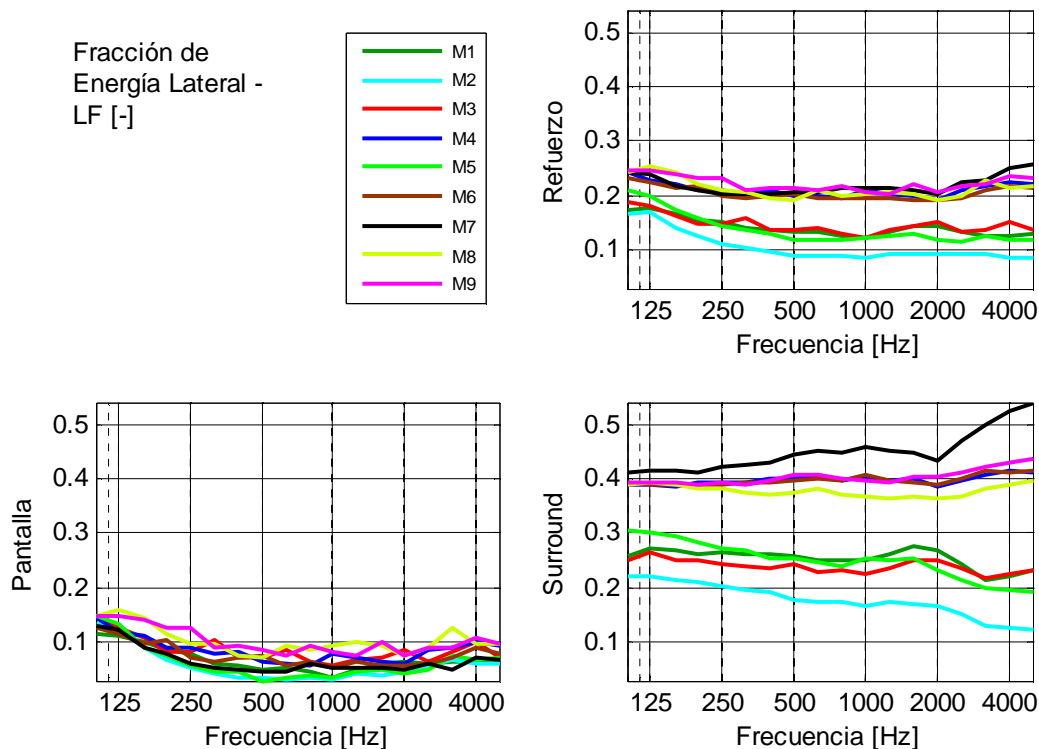


Figura 141. LF para distintas posiciones

Por último en este apartado, se incluyen algunos mapas de la banda de octava de 1000 Hz para ver el comportamiento del recinto en los puntos distintos a las 9 posiciones seleccionadas. Se incluyen únicamente los datos para los altavoces central, derecho y surround derecho porque los de los canales izquierdos son similares pero con orientación en espejo.

El tiempo de reverberación presenta muchas diferencias entre unos puntos y otros excitando la sala con los altavoces de pantalla y tiene, por tanto, un recubrimiento irregular en las zonas de audiencia. Los mayores valores de T30 se presentan en el fondo de la sala para estos altavoces. Si se ponen en funcionamiento los altavoces de surround las diferencias entre las distintas zonas son mucho menores y presenta su máximo en la esquina trasera donde están los altavoces en funcionamiento.

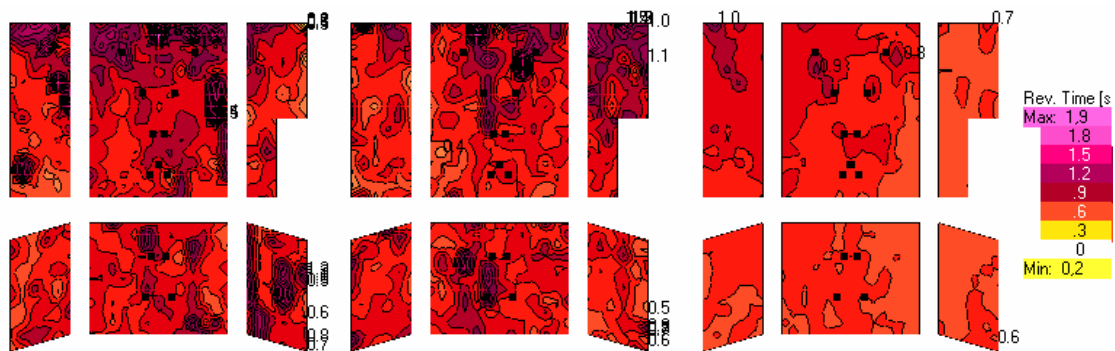


Figura 142. T30 [s] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)

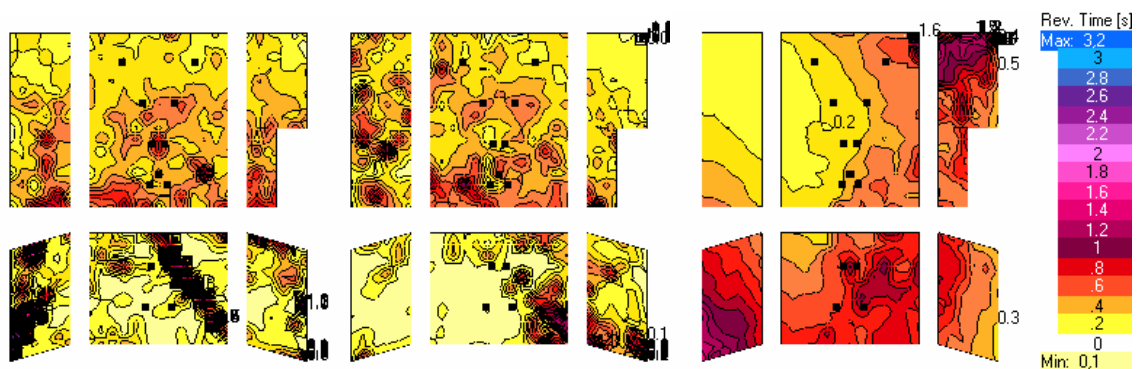


Figura 143. EDT [s] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)

En EDT, los valores bajos se presentan en la zona más próxima al altavoz que esté activo; la parte delantera de la sala para los altavoces de pantalla y la esquina trasera para los altavoces de surround. Los valores más altos aparecen en la parte

central de la sala para los altavoces de pantalla y en la esquina trasera opuesta para los de surround como se ve en la Figura 143.

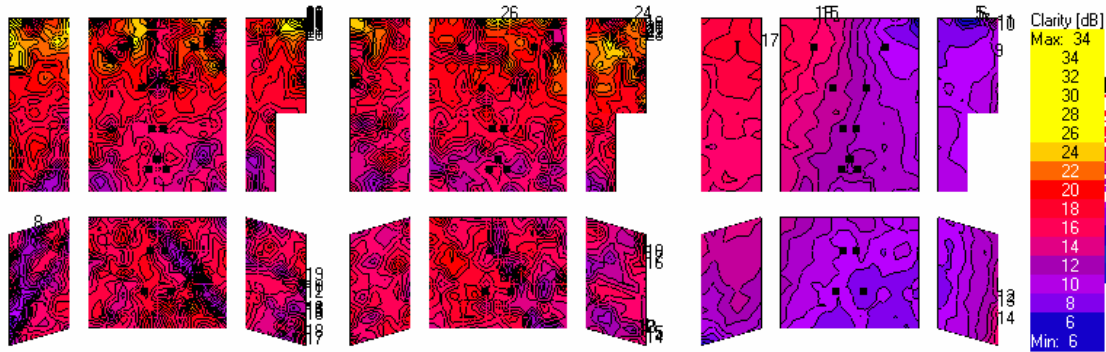


Figura 144. C80 [dB] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)

La distribución de C80 y D50 es similar para la zona de frecuencias medias. Los valores más altos se encuentran en la zona más alejada de los altavoces que están emitiendo para los canales de pantalla y en la esquina trasera para los de surround.

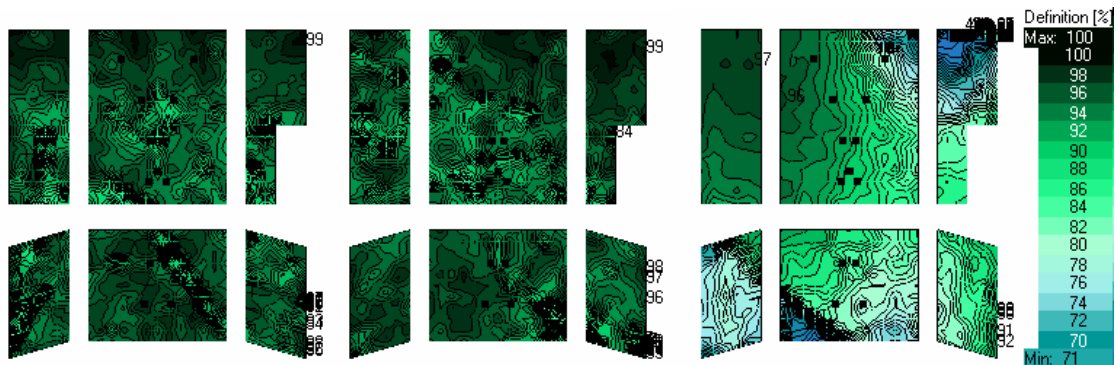


Figura 145. D50 [%] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)

Ts toma valores muy bajos para los altavoces de pantalla, como se muestra en la Figura 146. La zona cercana a los canales de pantalla presenta valores un poco menores que la parte trasera de la sala, pero no es una distribución uniforme. Los canales de surround presentan mayores diferencias en las distintas áreas de audiencia. Las zonas más cercanas a los altavoces presenta valores pequeños de Ts (parecidos a los de los canales de pantalla) pero en las zonas más alejadas aumenta considerablemente.

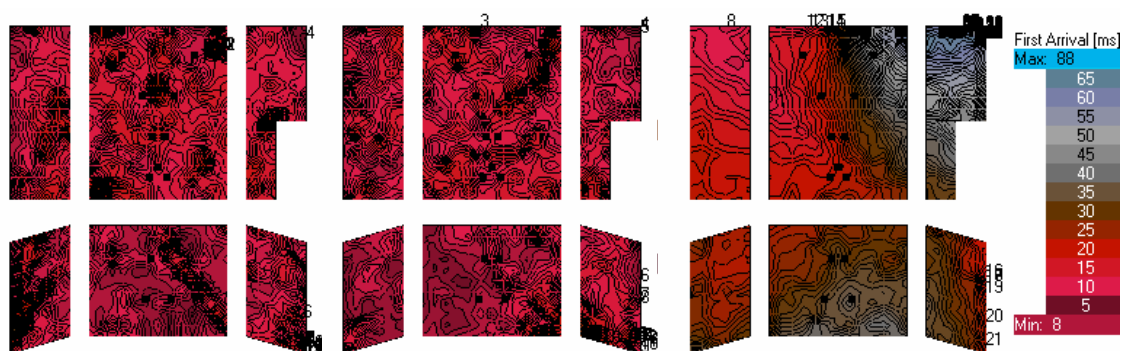


Figura 146.  $T_s$  [ms] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)

Los mapas de LF presentan especial importancia ya que explican por qué los valores promedio en las posiciones seleccionadas tienen unos u otros valores. Como se comentaba anteriormente, el canal L y el R presentan valores espejo al igual que los dos canales de surround, esto implica que los valores altos encontrados con un canal se compensan con los del otro canal. Por ejemplo, el punto M8 tiene un máximo para el SR (como se ve en la Figura 147) y un mínimo del canal SL. Ocurre lo mismo con los canales de pantalla, pero el problema disminuye por tener valores inferiores.

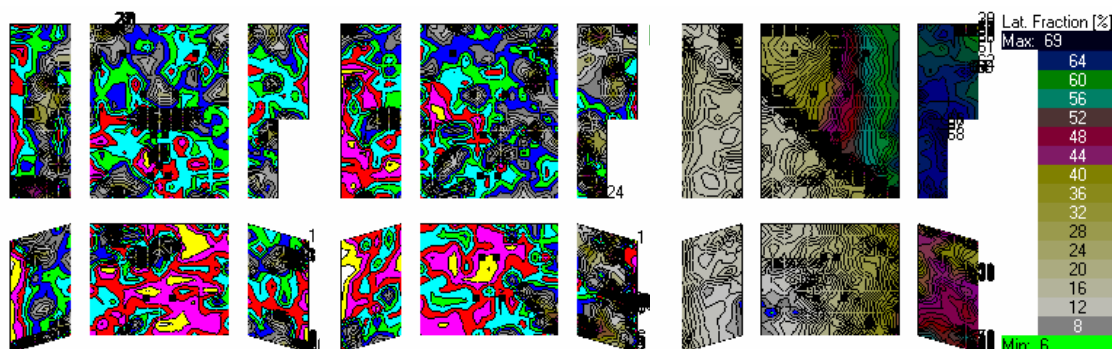


Figura 147. LF [%] en la banda de octava de 1 kHz para C (izquierda), R (centro) y RS (derecha)

#### 7.2.4. Distribución en función de la distancia

Para T30, D50 y LF no se ha apreciado una tendencia clara de con la distancia, por lo tanto no se incluyen los resultados obtenidos en este apartado. Si se ven ligeras influencias en el resto de parámetros, por lo que se van a analizar brevemente los resultados correspondientes únicamente a los canales de pantalla.

Mientras que T20 presenta un ligero aumento de valor con la distancia para las frecuencias bajas de 200 Hz a 315 Hz (ver Figura 148); EDT presenta una ligera caída en frecuencias bajas (Figura 149).

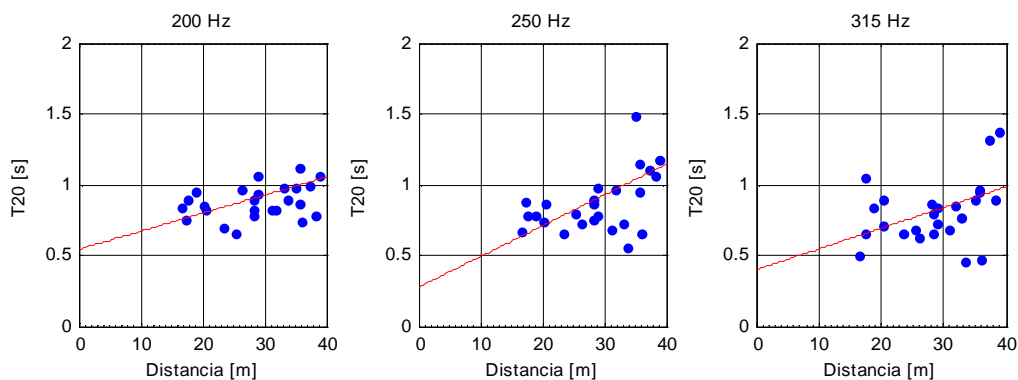


Figura 148. T20 simulado en función de la distancia

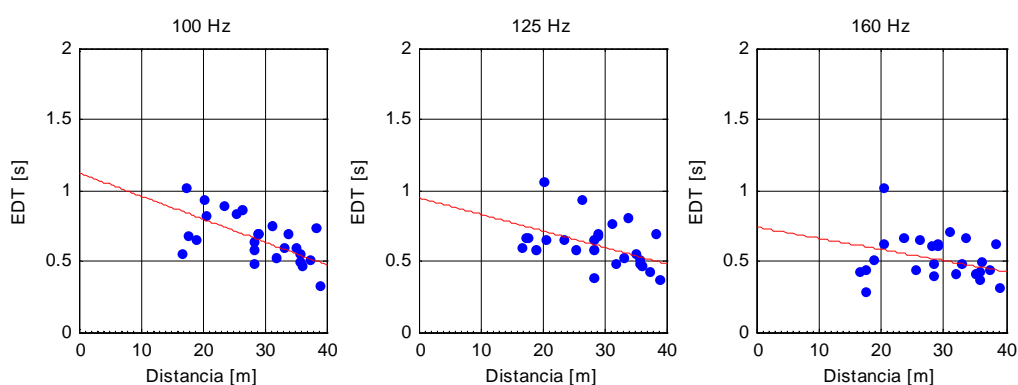


Figura 149. EDT simulado en función de la distancia

En el caso del Tiempo Central, se hace notable un aumento de su valor con la distancia en la zona de frecuencias medias. En el resto de bandas los datos son muy dispersos y no muestran una tendencia clara.

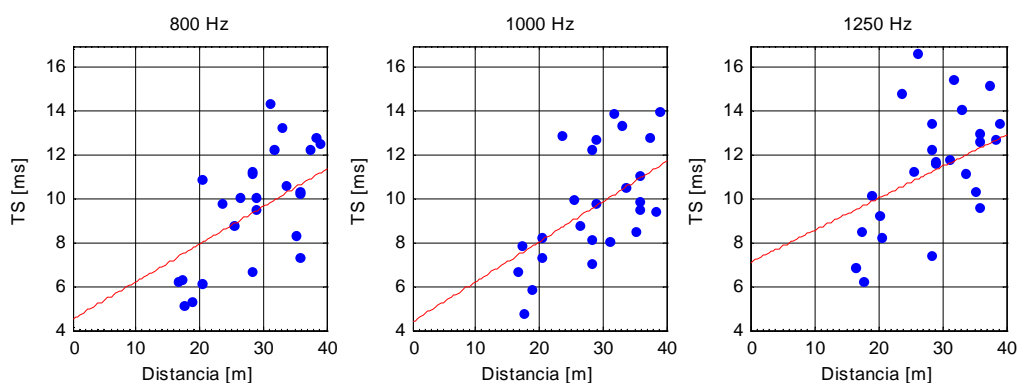


Figura 150. Ts simulado en función de la distancia

Por último, C80 sube en frecuencias altas al alejarnos de los altavoces. Entre las zonas más cercanas a las más alejadas existe una diferencia entre 6 dB y 8 dB.

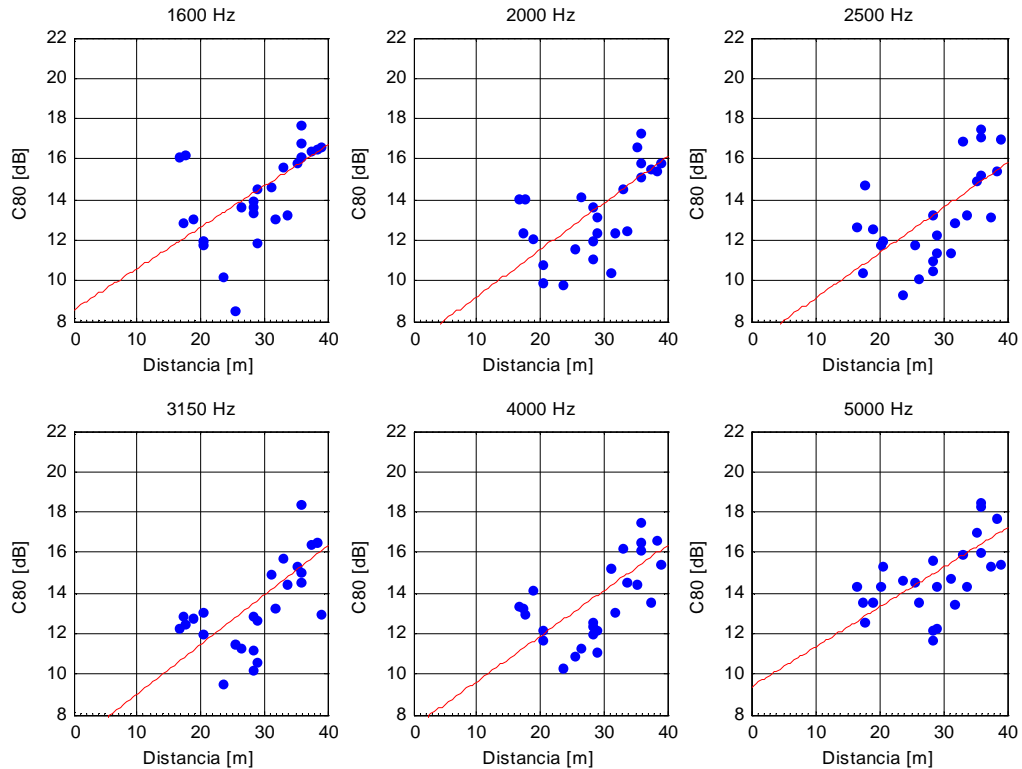


Figura 151. C80 simulado en función de la distancia

### 7.2.5. Valores globales

Como cabía esperar tras el análisis de los resultados promedio, existen grandes diferencias entre los valores globales combinando los altavoces de uno u otro modo. El único parámetro que no presenta diferencias en T20, ya que entre los altavoces de surround y los de pantalla únicamente hay 20 ms. T30 toma un valor de 0,73 s para los altavoces de pantalla que es un valor similar al T20, y un valor 100 ms menor para los altavoces de surround. Los parámetros subjetivos muestran mejores resultados de nitidez con los altavoces de pantalla que con los de surround los cuales están diseñados para incluir los efectos y envolver al oyente.

	Sist. Refuerzo		Pantalla		Surround	
Parámetro	Valor	$\sigma$	Valor	$\sigma$	Valor	$\sigma$
T20 <sub>med</sub> [s]	0,72	0,22	0,73	0,26	0,71	0,13
T30 <sub>med</sub> [s]	0,69	0,12	0,73	0,13	0,63	0,08
EDT <sub>m</sub> [s]	0,33	0,21	0,24	0,14	0,47	0,23
C80 <sub>m</sub> [dB]	14,39	3,68	16,36	2,51	11,43	3,15
D50 <sub>m</sub> [-]	0,91	0,08	0,94	0,03	0,85	0,09
Ts <sub>m</sub> [ms]	17,40	12,32	10,38	2,56	27,94	13,60
LF <sub>m</sub> [-]	0,18	0,18	0,08	0,04	0,33	0,20

Tabla. LXXV. Valores globales para la sala calculados a partir de la simulación con el sistema de refuerzo sonoro



# **8**

## **Estudio comparativo de los resultados**



El estudio comparativo se va a realizar en tres partes. En primer lugar se compararán los valores medidos y simulados para cada uno de los promedios realizados. Algunas de las diferencias entre ambos promedios se comprobaron durante el proceso de validación, pero no todas ellas. En segundo lugar, se realizará un estudio comparativo entre las dos mediciones realizadas, analizando parámetro a parámetro y punto a punto para ver la influencia del uso del sistema de refuerzo sonoro a la hora de realizar mediciones. Por último, se comparan algunas respuestas al impulso. Se han tomado los datos de las mediciones realizadas con el barrido sinusoidal ya que presentan menores valores bajos de INR y las desviaciones obtenidas son un poco menores.

## **8.1. Comparación de las mediciones y la simulación**

Las medidas realizadas y la simulación presentan bastantes diferencias sobre todo cuando se comparan los datos del sistema de refuerzo sonoro, ya que la validación se realizó con los datos de la fuente omnidireccional. Las menores diferencias se encuentran en media y alta frecuencia como se verá durante este apartado, siendo válido el modelo y obteniéndose resultados razonables. Únicamente se incluirán las representaciones de las diferencias en JND para evitar acumulación de gráficas. En el 10.3, se incluyen las figuras correspondientes a los distintos parámetros en las que se compara los valores de las mediciones y la simulación.

### **8.1.1. Tiempo de reverberación: T20 y T30**

El modelo creado se ha ajustado con el T30 promedio de la sala medido con fuente omnidireccional, por lo tanto las diferencias entre simulación y medición para este parámetro son menores a 2 JND. Los valores de JND se han calculado a partir de los datos de las mediciones. T20 también se ajusta a estas diferencias, pero no ocurre lo mismo para el sistema de refuerzo sonoro. Existen unas diferencias muy grandes especialmente en frecuencias por debajo de 500 Hz, siendo mayor los valores de T20 y T30 simulados que los medidos. En el caso de T30, los valores a partir de 500 Hz se ajustan bastante bien a la realidad con diferencias inferiores a 3,2 JND.

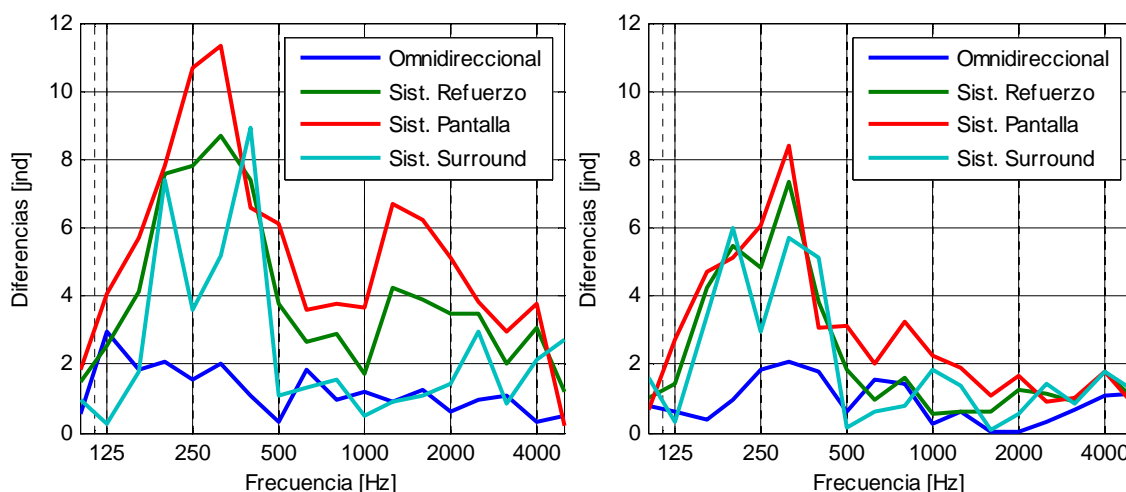


Figura 152. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: T20 (izquierda) y T30 (derecha)

Se van a comparar los promedios por altavoces para ver cuales proporcionan resultados más alejados de los medidos: las diferencias en T20 son inferiores a 3,5 JND para las tres posiciones de fuente omnidireccional, excepto para la banda de 125 Hz y F2 que alcanza 4,8. Mientras que los altavoces de pantalla (C, L y R) presentan diferencias muy altas. Los altavoces de surround medidos y simulados se comportan de manera similar a partir de 500 Hz. En T30 la simulación y la medición son similares a partir de la banda de 500 Hz. En frecuencias inferiores las diferencias en los altavoces de la sala son muy altas.

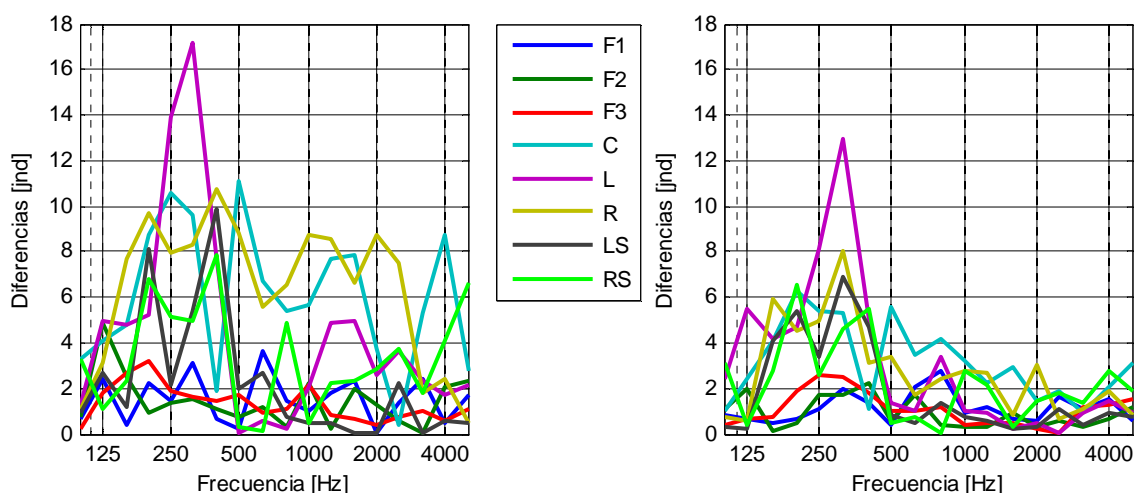


Figura 153. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación: T20 (izquierda) y T30 (derecha)

En cuanto a promedios por posiciones de micrófono, las diferencias con la fuente omnidireccional son inferiores a 5 JND en la mayoría de las bandas. T30 de nuevo presenta mejores resultados como se aprecia en la Figura 155. Es

especialmente problemática la posición M8 para ambos parámetros y fuentes y la posición M7 para los altavoces de pantalla. De nuevo, se observa que a partir de 500 Hz los resultados son más fiables.

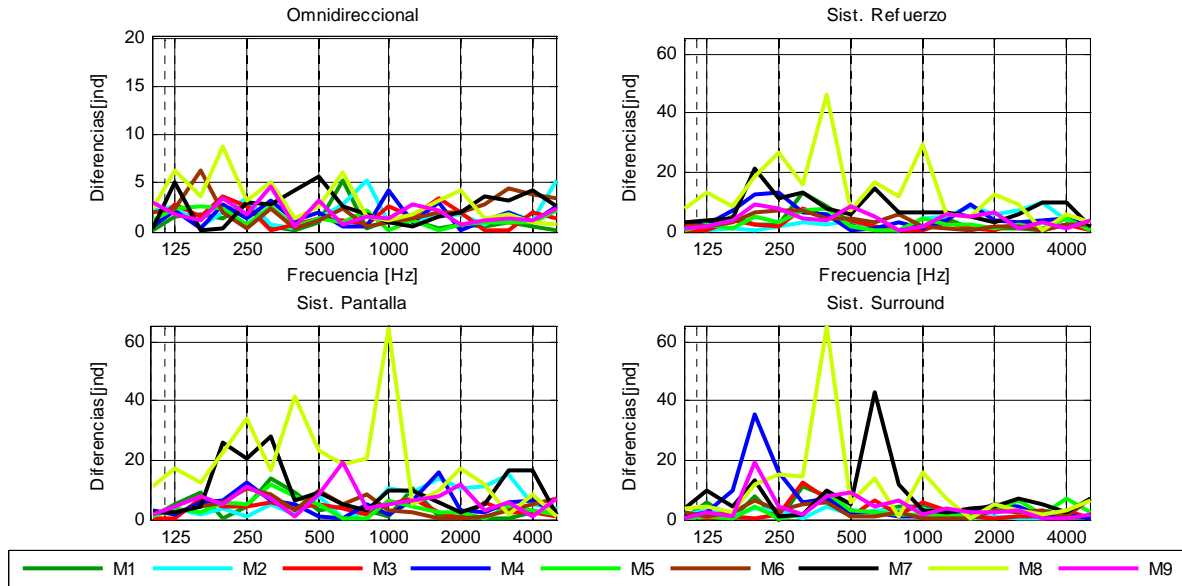


Figura 154. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: T20

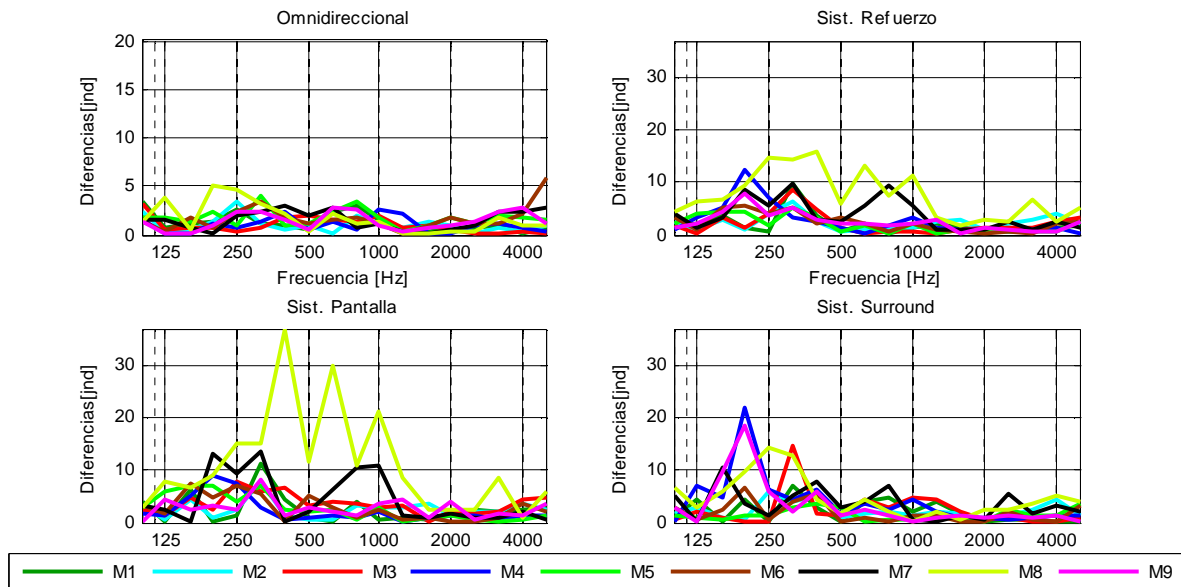


Figura 155. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: T30

Por lo tanto, se ha comprobado que el modelo realiza correctamente las simulaciones del tiempo de reverberación (T20 y T30) para la fuente omnidireccional tanto en valores promedios como punto a punto. Además, los valores obtenidos con el

sistema de refuerzo sonoro son válidos a partir de 500 Hz, dando mejores resultados en el cálculo de T30, excepto en la posición M8.

### 8.1.2. Tiempo de reverberación inicial: EDT

EDT medido y simulado con fuente omnidireccional presentan diferencias inferiores a 3,5 JND, excepto las bandas de 600 Hz y 3150 Hz, que alcanzan los 5,0 JND y 4,2 JND respectivamente. Las mediciones con el sistema de refuerzo sonoro están marcadas por unos valores de EDT especialmente bajos para frecuencias medias y altas, por lo que el valor del JND será muy pequeño (entre 10 ms y 20 ms). Esto hace que las diferencias se incrementen notablemente si se miran los valores en JND, aunque no son tan distintas en segundos (ver Figura 156). Aún así, las diferencias siguen siendo apreciables en casi todas las bandas.

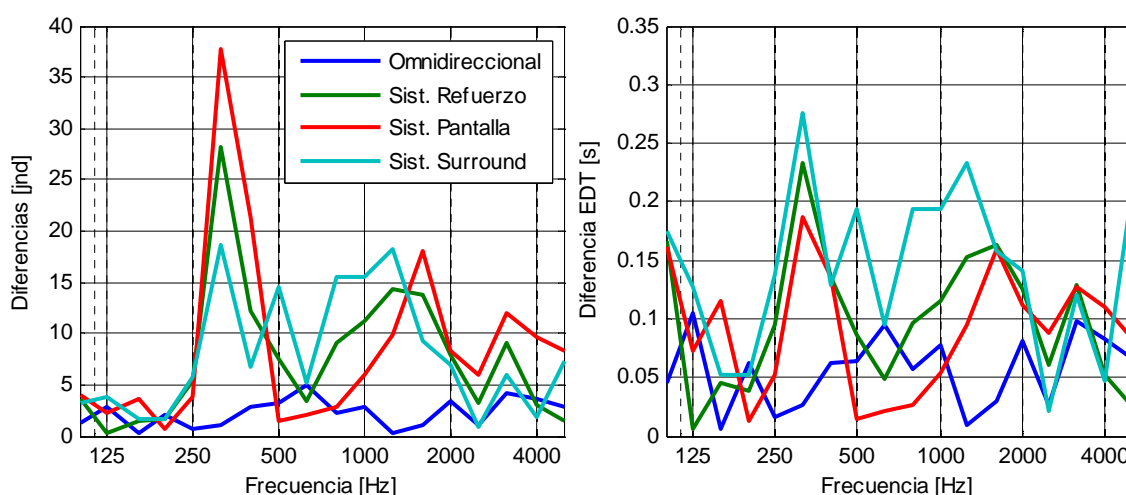


Figura 156. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: EDT

Si se observan los datos por fuentes, las diferencias entre medida y simulación son bastante altas (en JND), especialmente para el canal L, aunque si se miran las diferencias en tiempo es LS el que mayores diferencias presenta (Figura 157).

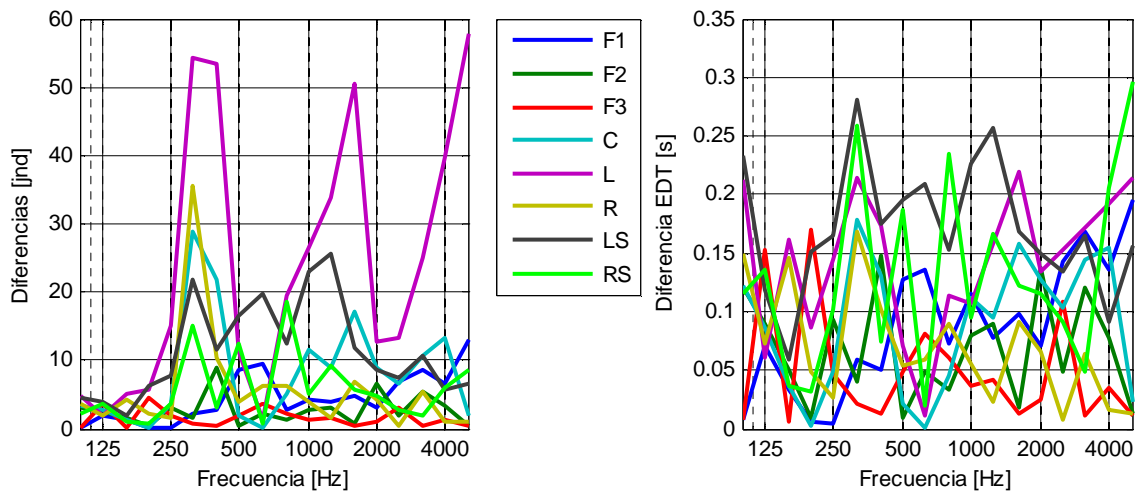


Figura 157. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación: EDT

Las posiciones M1 y M9 son las que mayores diferencias presentan entre simulación y medición para la fuente omnidireccional, el resto de posiciones las diferencias son algo menores. Para el sistema de refuerzo sonoro las diferencias son altas en todos los puntos superando los 50 JND en bastantes ocasiones.

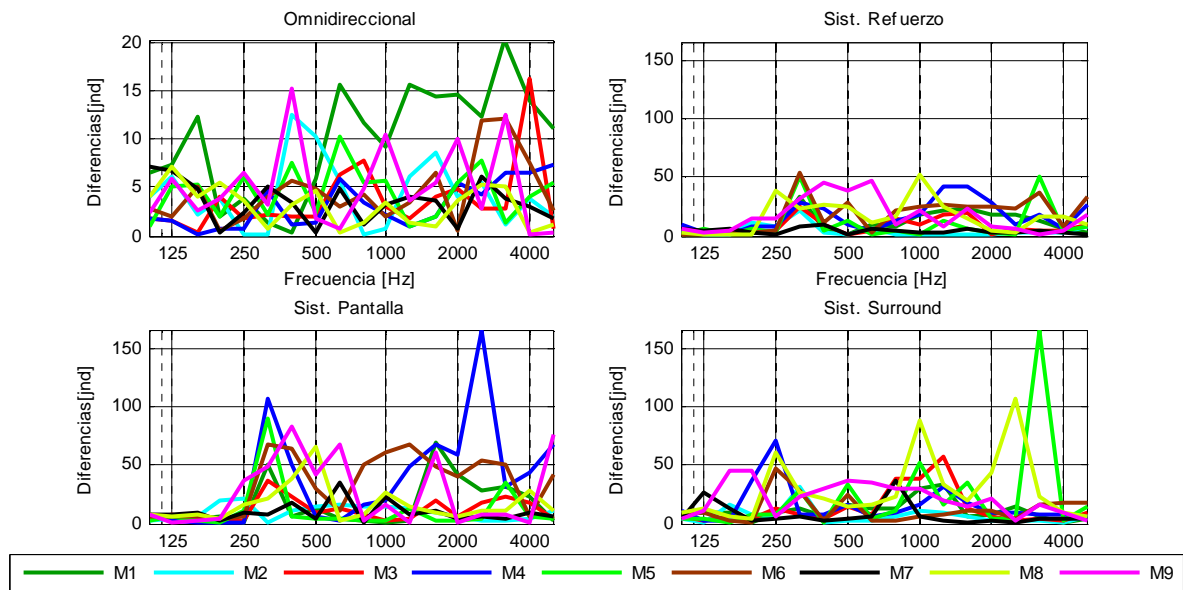


Figura 158. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: EDT

EDT presenta diferencias muy grandes pero se podrían dar por válidos los resultados válidos para la fuente omnidireccional, pero las diferencias con el sistema de refuerzo sonoro son demasiado altas. Con lo cual el modelo no responde como se esperaba.

### 8.1.3. Claridad

C80 es el segundo parámetro que se va a estudiar. Como se observa en la Figura 159 las diferencias del valor promedio medido y simulado son inferiores a 3 JND en la zona de frecuencias medias. Por debajo de 250 Hz, el valor de C80 medido es inferior al simulado presentando las mayores diferencias con los altavoces de pantalla (en torno a 6,5 dB). Por encima de esa frecuencia los valores simulados son inferiores.

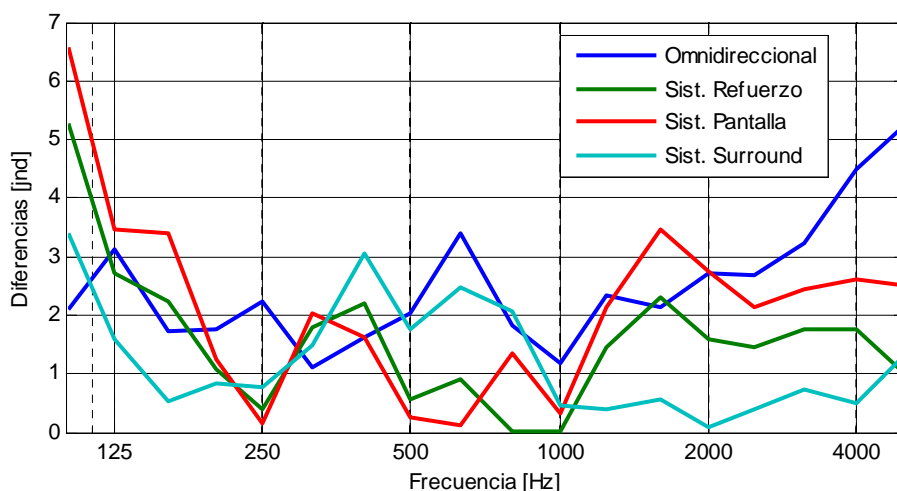


Figura 159. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: C80

Si se analizan los datos fuente por fuente, se aprecia que la fuente F3 es la que mejor se ajusta a la realidad junto a canal RS con diferencias inferiores a 2 dB en frecuencias medias y altas. Para todos los casos el mejor ajuste se consigue en frecuencias medias, de 200 Hz 1000 Hz.

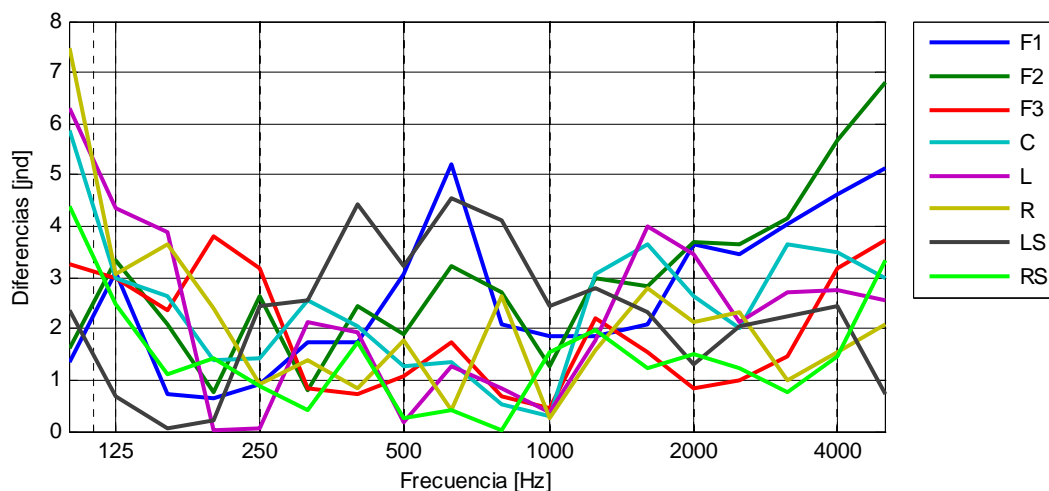


Figura 160. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación: C80



En un análisis por posiciones, se observa que entre C80 simulado y medido se presentan menores diferencias para los altavoces de surround y la fuente omnidireccional. En la Figura 161, se ve como para los canales de surround las diferencias son inferiores a 4 dB en casi todas las bandas; lo mismo ocurre para la fuente omnidireccional en frecuencias medias. Los altavoces de pantalla dan peores resultados. En los promedios de fuente omnidireccional, los puntos con mayores diferencias son M1 y M2 para frecuencias medias y altas y el punto M8 para frecuencias por debajo de 250 Hz. Si se promedian todos los datos del sistema de refuerzo sonoro los resultados son mejores.

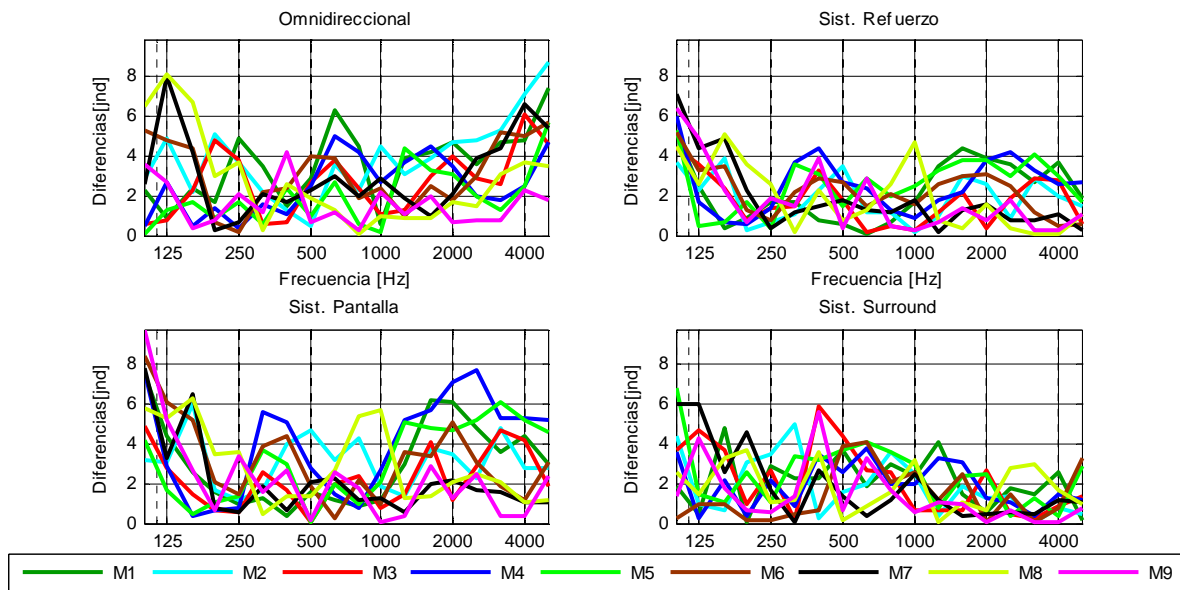


Figura 161. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: C80

Por lo tanto, cómo los valores medidos son mejores a la simulación en media y alta frecuencia se puede utilizar el modelo, ya que proporciona una idea clara de lo que ocurre pero con peores resultados. Además las diferencias no son demasiado altas ya que tanto el modelo, como los materiales o el software tienen cierta incertidumbre. En la zona de baja frecuencia los resultados no son fiables y el modelo no responde correctamente, ya que los resultados de los medidos son mucho mejores a los medidos con diferencias de hasta 9 dB.

#### 8.1.4. Definición

Los promedios de la Definición no presentan diferencias perceptibles por encima de 250 Hz para el sistema de refuerzo sonoro. En frecuencias inferiores alcanzan diferencias de más de 7 JND para los altavoces de pantalla. Con la fuente

omnidireccional el ajuste no es tan exacto, pero tampoco se superan los 2 JND entre las bandas de 315 Hz a 3150 Hz y la diferencia máxima es 4,2 JND (0,21).

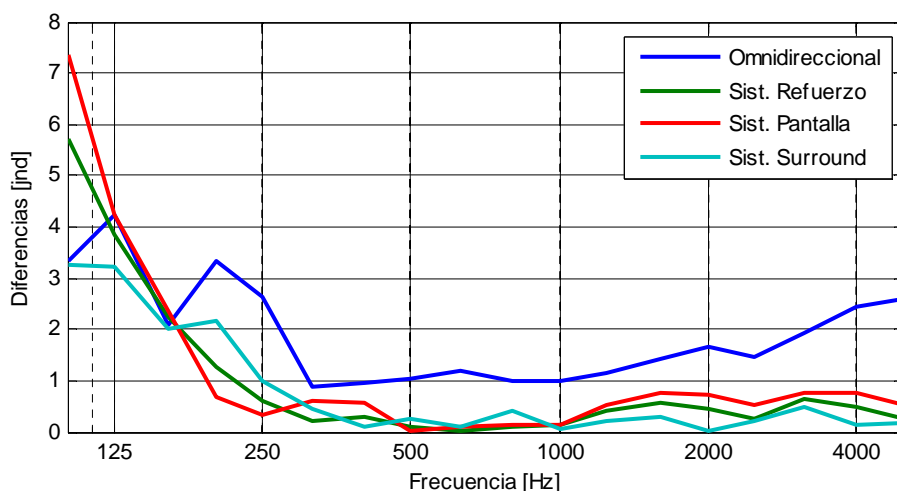


Figura 162. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: D50

Si se analizan los promedios por altavoces se reiteran los resultados anteriores. No existen diferencias perceptibles entre los valores medidos y simulados para los canales de pantalla a partir de 200 Hz. Para los canales de surround las diferencias son un poco mayores, aunque no superan los 2 JND en frecuencias medias. En cuanto a la fuente omnidireccional, F1 presenta diferencias en frecuencias altas a partir de 1600 Hz y F2 y F3 en las bandas en torno a 200 Hz. Por encima de 315 Hz ninguna de las diferencias supera los 3 JND.

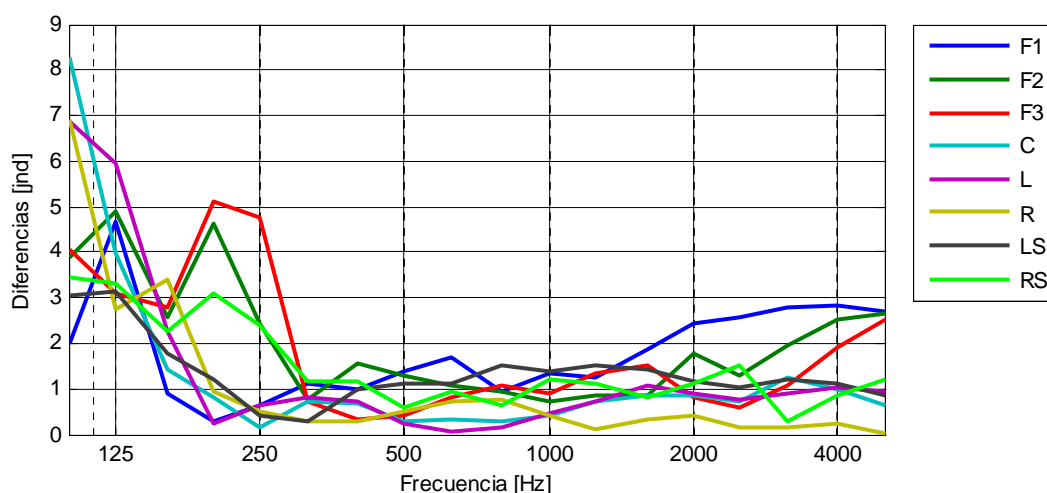


Figura 163. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación:: D50

Por último, en un estudio posición por posición se observa que por encima de 250 Hz para los altavoces de pantalla o todo el conjunto de refuerzo sonoro las diferencias son inferiores a 2 JND. La posición M8 es la que provoca mayores diferencias entre valores simulados y medidos con los altavoces de surround, junto con la posición M6. El resto de posiciones no presenta grandes diferencias.

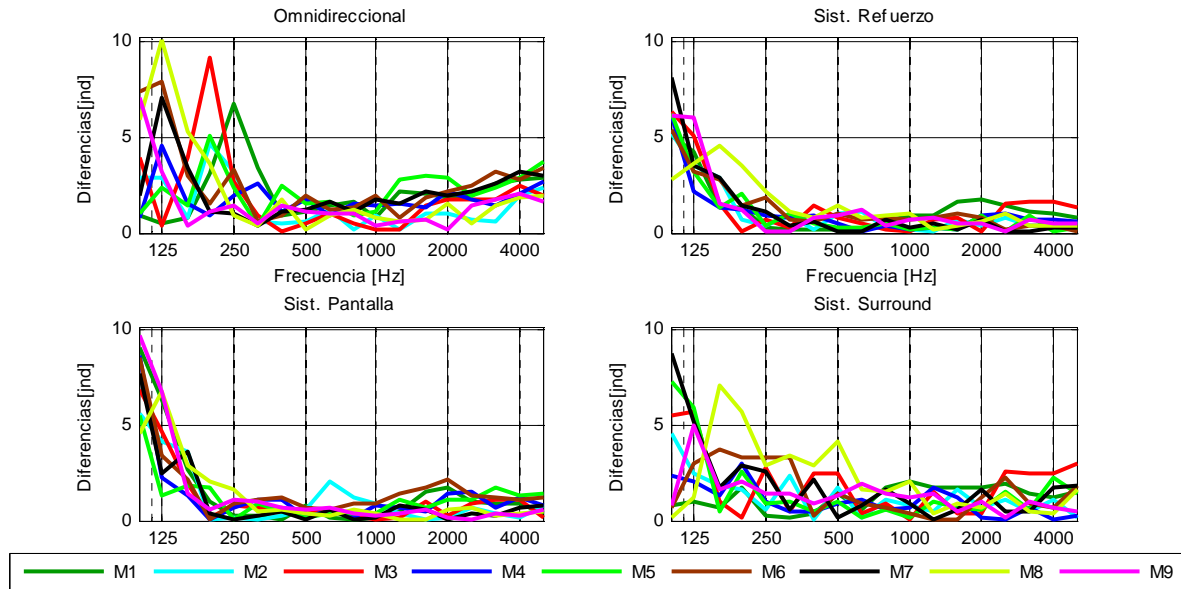


Figura 164. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: D50

De nuevo, el modelo es válido para frecuencias medias y altas obteniendo valores muy ajustados a los medidos. La posición M8, esquina trasera de la sala, provoca los mayores problemas en la mayoría de los parámetros por lo que se puede suponer que no solo es fallo del modelo sino de la medición. Ya se ha comprobado que en baja frecuencia el modelo no funciona como se esperaba.

### 8.1.5. Tiempo central

Como con el resto de parámetros analizados hasta el momento, se consigue mejor ajuste en la zona de media y alta frecuencia que en baja frecuencia como se observa en la Figura 165. A partir de 250 Hz, todos los promedios comparados presentan diferencias inferiores a 30 ms (3 JND). Los datos medidos y simulados se ajuntan mejor en el caso de la fuente omnidireccional con diferencias inferiores a 10 ms a partir de 400 Hz. Las diferencias más altas se encuentran en bajas frecuencias ya que los valores medidos se encuentran entre 60 ms y 100 ms y los simulados no alcanzan los 5 ms.

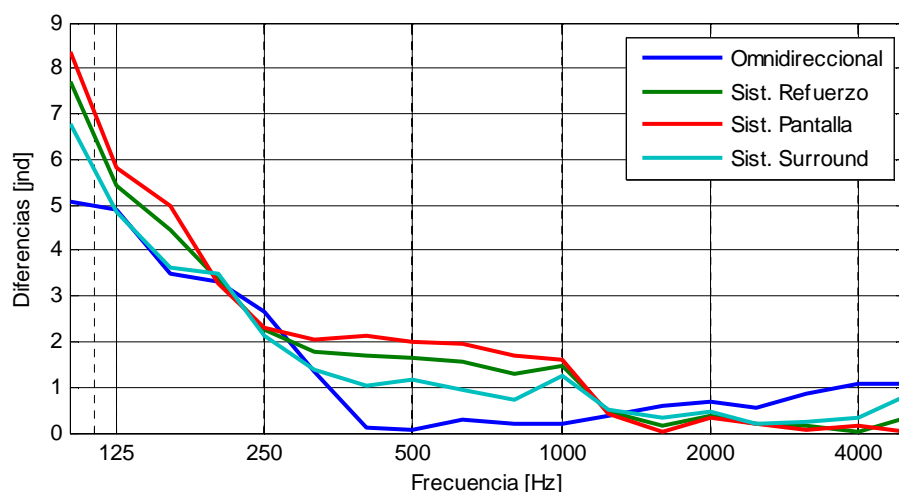


Figura 165. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: Ts

No se aprecian grandes diferencias entre los resultados obtenidos en los promedios de la sala y los promedios por altavoz. Las bandas con diferencias mayores son las mismas, las diferencias son prácticamente iguales, pero se puede destacar que el altavoz de surround izquierdo presenta unas diferencias inferiores al resto entre 315 Hz y 1000 Hz como se ve en la Figura 166. Además los valores altos en baja frecuencia para el conjunto de pantalla se deben a los tres altavoces y no a uno en particular.

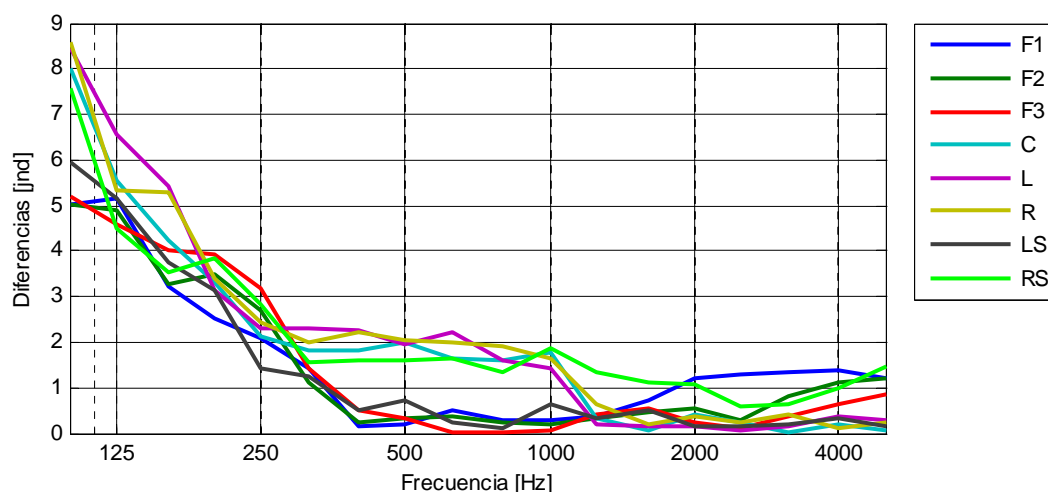


Figura 166. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación:: Ts

No existen diferencias marcadas por posiciones para el caso de la fuente omnidireccional, pero si en los cálculos realizados con el sistema de refuerzo sonoro. Las posiciones delanteras de la sala (M1 y M2) presentan diferencias más grandes

que el resto (mayores de 4 JND) para frecuencias medias y bajas, así como la posición M8 para el conjunto de surround.

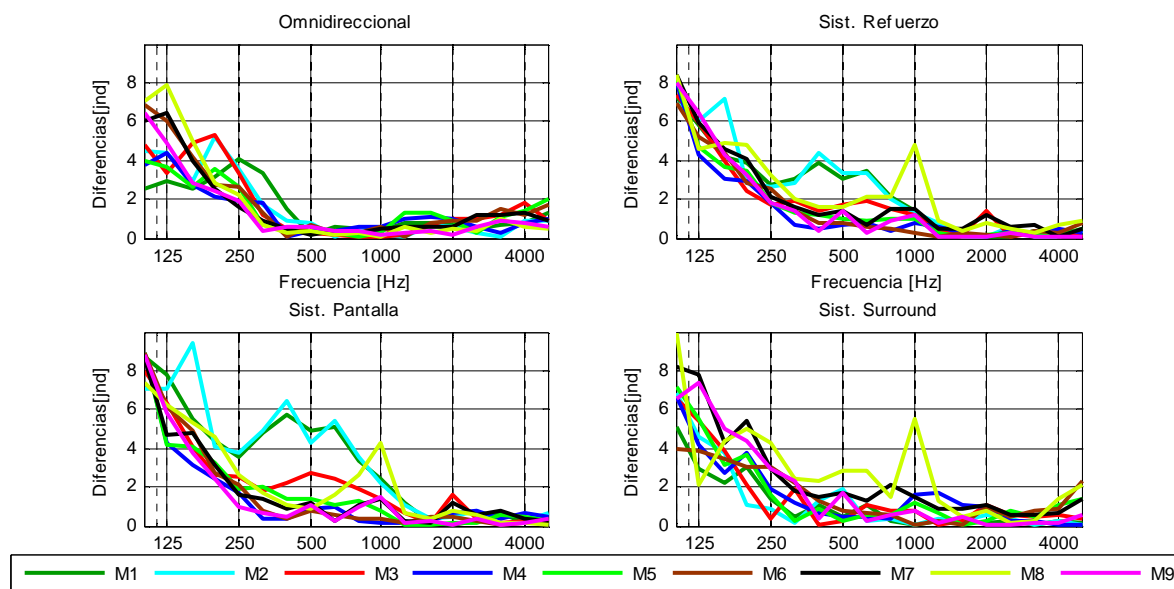


Figura 167. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: Ts

Este parámetro da buenos resultados en la simulación en frecuencias medias y altas, no así en frecuencias bajas donde las diferencias son considerables. Habría que prestar especial atención a los datos medidos para los puntos M1 y M2 ya que las diferencias son considerables y es posible que la simulación proporcione datos más razonables.

### 8.1.6. Fracción de Energía Lateral

Son menores las diferencias de los promedios de la sala calculados a partir de los datos medidos y simulados en el caso de los altavoces de pantalla para LF, con diferencias de 2 JND en frecuencias medias. Además, estas diferencias son menores de 4 JND en casi todas las bandas. Los resultados obtenidos con fuente omnidireccional no son tan fiables, ya que medición y simulación se separan en mas de 4 JND (0,2) en bandas inferiores a 315 Hz y superiores a 800 Hz como se ve en la Figura 168. El caso de los altavoces de surround presentan grandes diferencias por la colocación del micrófono bidireccional durante las medida, presentando una respuesta impulsiva con mayor energía para este micrófono que para el omnidireccional. Se puede decir que el modelo responde bien en frecuencias por encima de 250 Hz para los altavoces de la pantalla pero no para la fuente omnidireccional o el conjunto de surround.

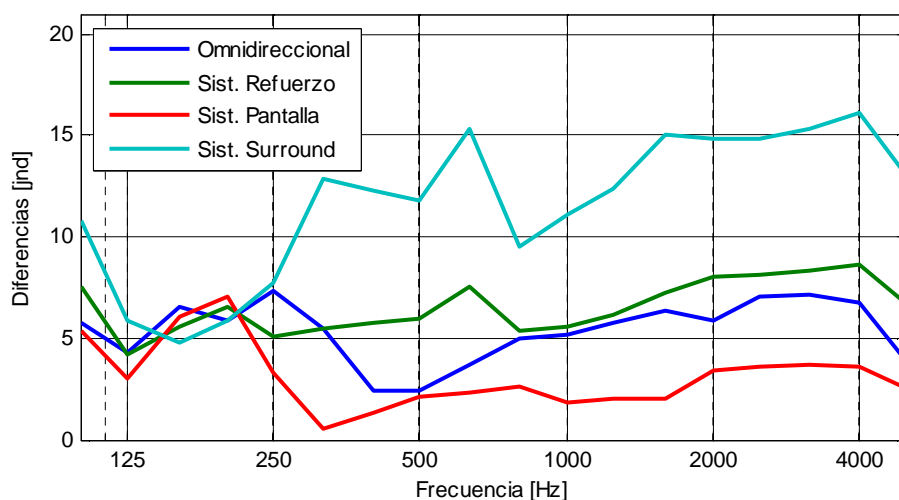


Figura 168. Diferencias entre promedios de sala de las mediciones y la simulación: LF

Esta claro que el modelo responde de manera distinta a lo esperado para los altavoces de surround derecho (RS) como se aprecia en la Figura 169. Las diferencias en LS son menores y parecidas a las de F3. En alta frecuencia , a partir de 2000 Hz, R presenta diferencias mayores a C y L, incrementando con ello las diferencias del promedio de los altavoces de pantalla.

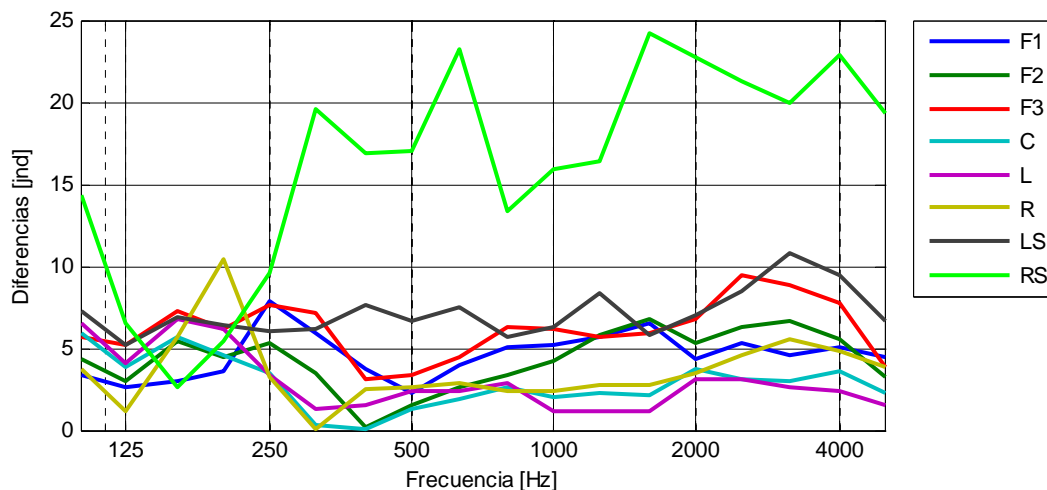


Figura 169. Diferencias entre promedios por fuente de las mediciones y la simulación: LF

Si se analizan las distintas posiciones, no se encuentran posiciones con diferencias especiales o datos más dispares ni para fuente omnidireccional ni para los canales de pantalla. En cambio, las posiciones M6, M7 y M8 presentan diferencias muy grandes para los promedios del surround, esto se debe a los valores excesivamente altos medidos para el canal RS (mayores del 100%).

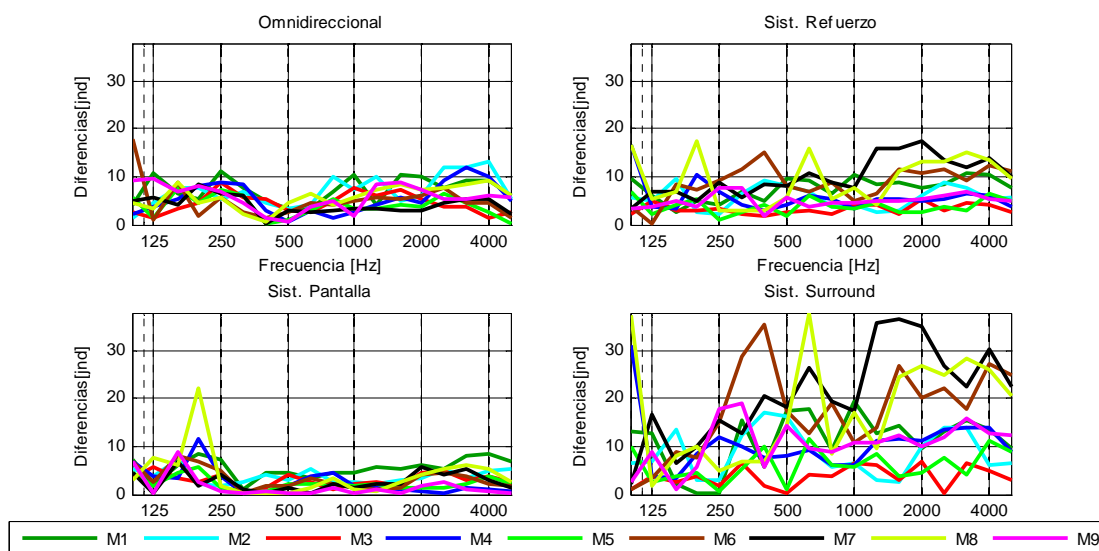


Figura 170. Diferencias entre promedios por micrófono de las mediciones y la simulación: LF

Con el modelo creado no se puede predecir los datos de LF punto a punto, ya que distan demasiado de los medidos especialmente con la fuente omnidireccional. Aunque si que se puede obtener una idea general de este parámetro para los altavoces de pantalla en media y alta frecuencia. Además, tienen más sentido los datos obtenidos para los altavoces de surround con la simulación con valores LF ya que LF se mide en tanto por ciento o tanto por uno y los datos obtenidos para RS son mayores que 1 en algunas ocasiones.

## 8.2. Comparación de las mediciones: Fuente omnidireccional y sistema de refuerzo sonoro

Después de todo el trabajo realizado es imprescindible la comparación de los resultados de ambas mediciones. Se realizará un pequeño estudio parámetro a parámetro comparando los promedios de la sala, los promedios por fuente y los promedios por posiciones. Los valores en JND se han calculado siempre en relación al valor de los parámetros medidos con fuente omnidireccional. Se apreciarán mayores diferencias en el caso de los parámetros subjetivos relacionados con la inteligibilidad de la sala que con los tiempos de reverberación.

### 8.2.1. Tiempo de reverberación: T20 y T30

T20 toma valores similares para los distintos promedios realizados con los altavoces del sistema de refuerzo sonoro como se ve en la Figura 171, pero existen un

pequeño desplazamiento de los valores mínimos de 630 Hz (para la fuente omnidireccional) a 400 Hz. Esto provoca que en la zona de frecuencias medias existan mayores diferencias entre unos y otros sistemas. Estas diferencias superan los 5 JND para el sistema de surround.

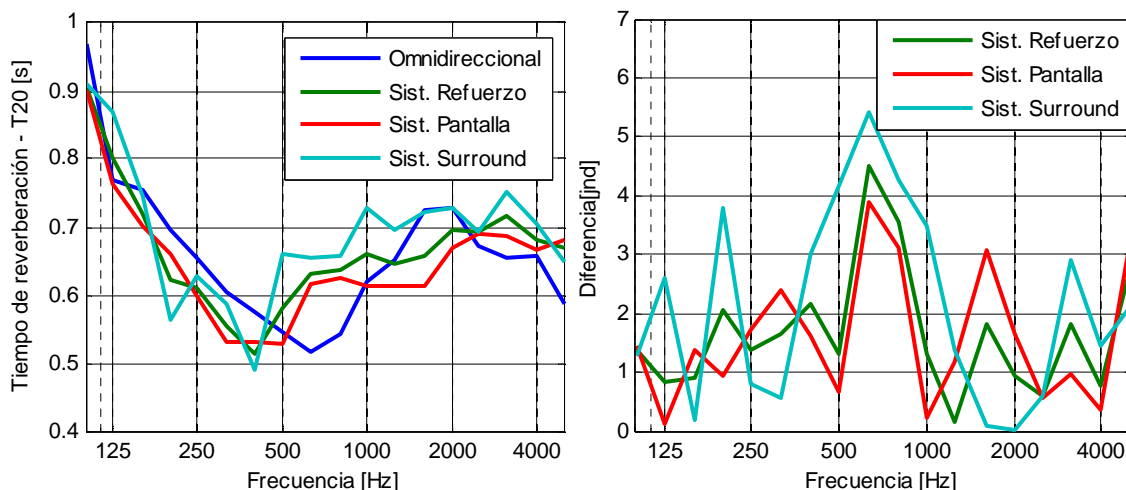


Figura 171. Valores y diferencias entre promedios de la sala: T20

Para T30, las diferencias entre una y otra combinación de los canales de pantalla es aún menor, pero se produce un desplazamiento del valor mínimo hacia frecuencias más bajas, al igual que ocurre con T20. Las diferencias no superan los 3 JND en ninguna banda, lo que implica diferencias menores de 90 ms.

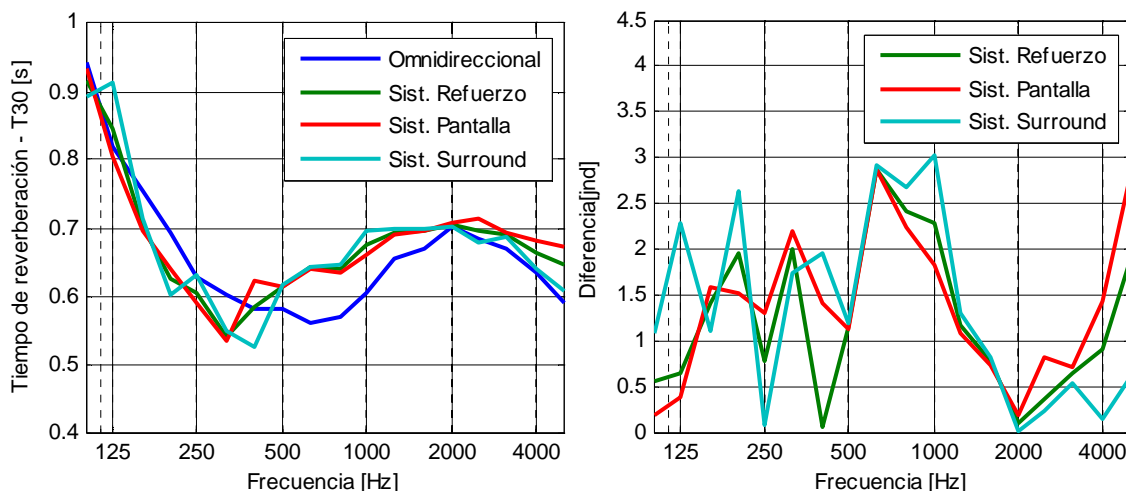


Figura 172. Valores y diferencias entre promedios de la sala: T30

Si se observan los promedios por posición de fuente de la Figura 173 y la Figura 174 la distribución de las curvas son similares, excepto para la curva del altavoz C que toma valores especialmente bajos para T20 y valores similares al resto de curva



para T30. Además los valores para los altavoces de surround son un poco mayores en ambos casos.

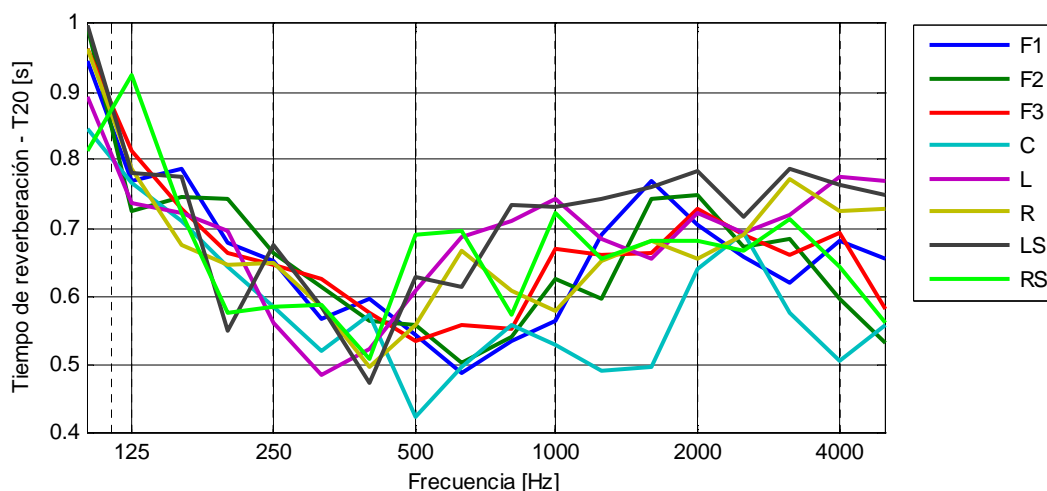


Figura 173. Valores de los promedios por fuente:  $T_{20}$

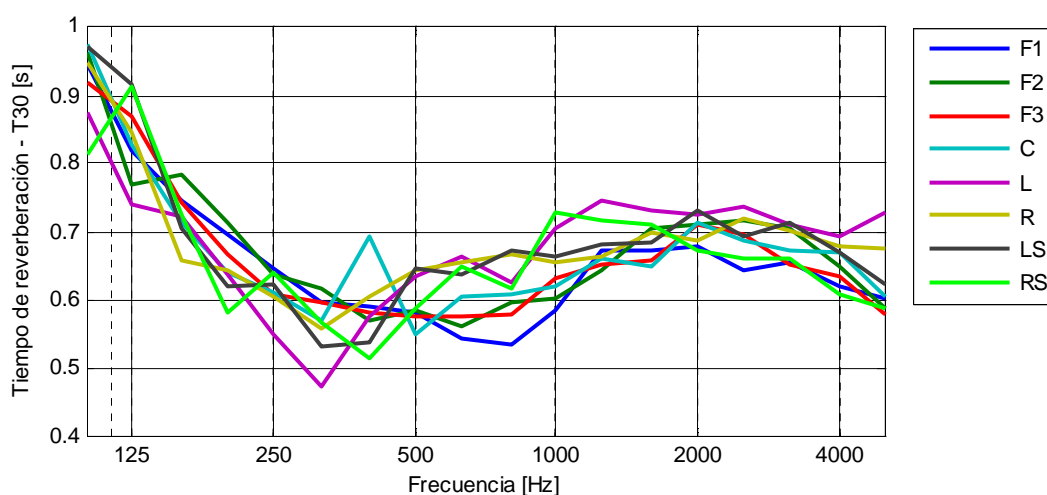


Figura 174. Valores de los promedios por fuente:  $T_{30}$

En la comparación punto a punto se ve que las posiciones presentan mayores diferencias con los datos medidos con fuente omnidireccional. Por ejemplo, la posición M8 muestra una diferencia de más de 20 JND para  $T_{20}$  y el conjunto de altavoces de surround. A parte de las posiciones traseras, las diferencias en  $T_{30}$  son superiores a 5 JND en los puntos M1 y M3 para frecuencias medias. En general, las diferencias son menores para  $T_{30}$  que para  $T_{20}$  y para los altavoces de surround frente a los de pantalla.

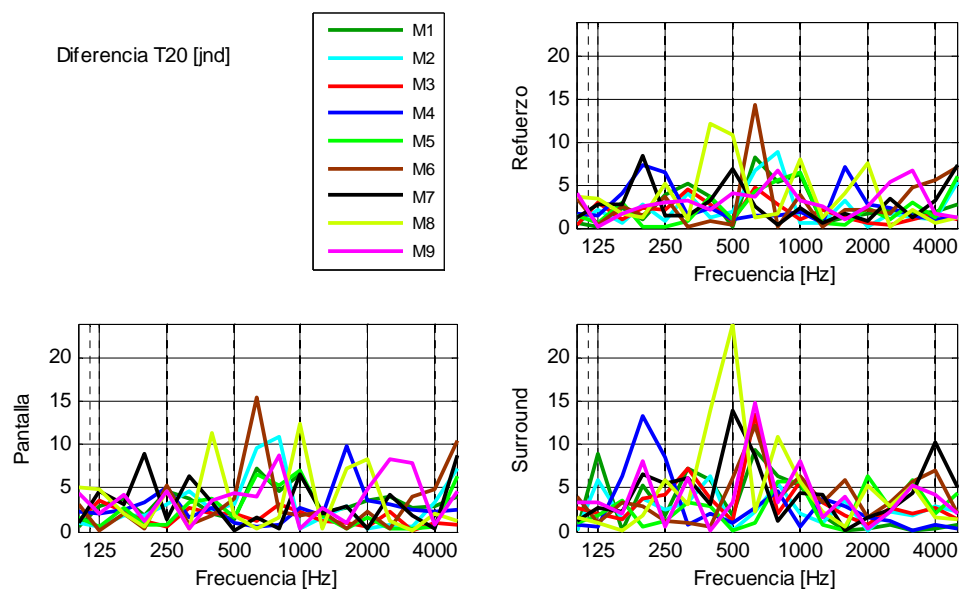


Figura 175. Diferencias entre promedios por micrófono: T20

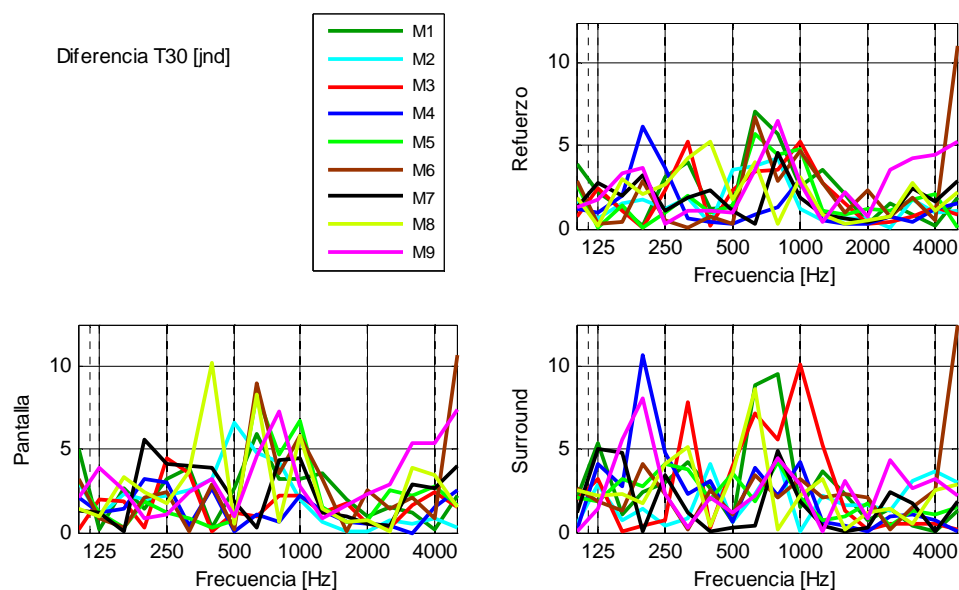


Figura 176. Diferencias entre promedios por micrófono: T30

Se considera posible medir los valores de T20 y T30 con los altavoces de pantalla sin alejarnos demasiado de los valores según la norma, especialmente el último, ya que las diferencias entre los datos son comparables a las desviaciones estándar calculadas (aproximadamente de 100 ms en frecuencias medias).

### 8.2.2. Tiempo de reverberación inicial: EDT

Éste es el primero de los aspectos subjetivos que se van a analizar y en el que se van a ver las diferencias más claras entre el uso de uno u otro tipo de fuente. Si se observa la Figura 177, EDT toma valores parecidos a T20 o T30 cuando se usa la fuente omnidireccional, aunque ligeramente menores, pero no ocurre lo mismo con el sistema de refuerzo sonoro. Los altavoces de pantalla proporciona un EDT mucho menor al medido con fuente omnidireccional, las diferencias superan los 8 JND en las bandas superiores a 200 Hz. Con los altavoces de surround los resultados son intermedios entre ambos casos.

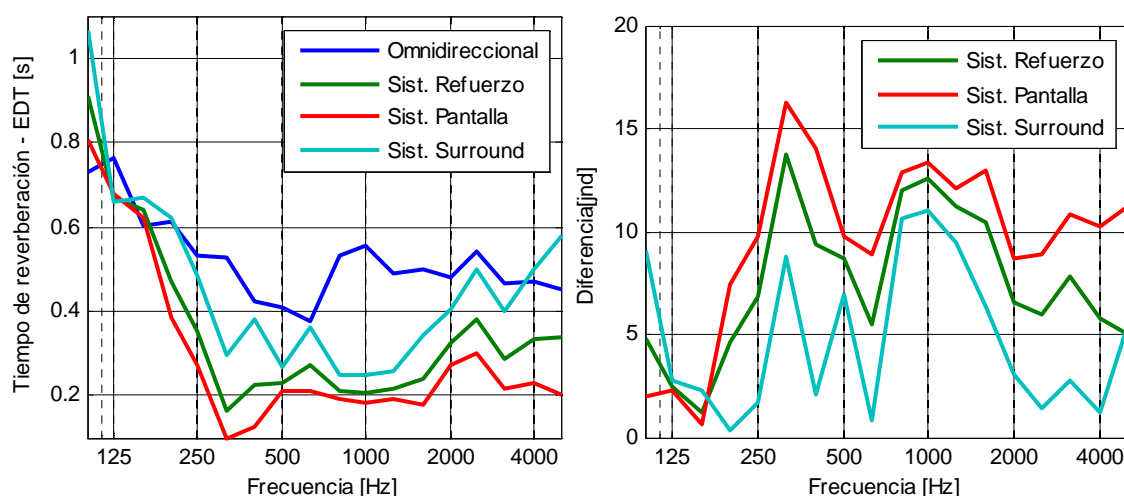


Figura 177. Valores y diferencias entre promedios de la sala: EDT

Los datos por posición de fuente revelan muchas características importantes a resaltar. El canal RS presenta unos valores de EDT parecidos a la fuente omnidireccional, pero por encima del resto de canales. Las posiciones de la fuente omnidireccional toman valores similares (un poco menores en F3), pero los canales de pantalla distan unos de otros más de 100 ms en algunas bandas. El canal L presenta valores inferiores a todas las posiciones de fuente utilizadas a partir de 200 Hz. Esto implica que para los canales simétricos se presenta mayor valor de EDT en el derecho al izquierdo: RS frente a LS, R frente a L y F3 frente a F1. Esto puede deberse alguna característica de la sala (como que en el lado izquierdo se encuentra el pasillo de entrada) o a la distribución de puntos.

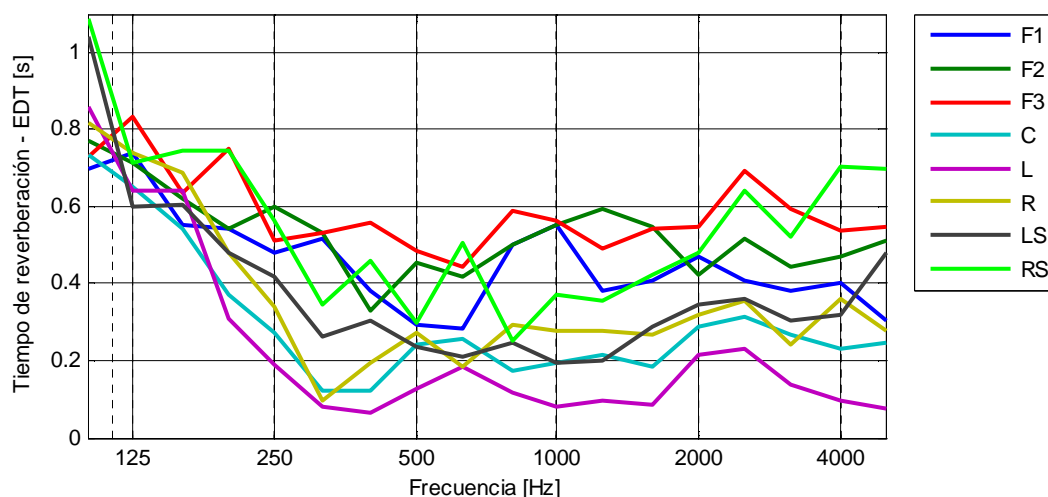


Figura 178. Valores de los promedios por fuente: EDT

Las diferencias entre los promedios de EDT punto a punto obtenidos con fuente omnidireccional y los canales de refuerzo sonoro punto a punto presentan diferencias muy grandes en todas las bandas de frecuencia y para todos los puntos. En la mayoría de los casos superan los 10 JND, siendo los casos peores las posiciones traseras de la sala (M7, M8 y M9).

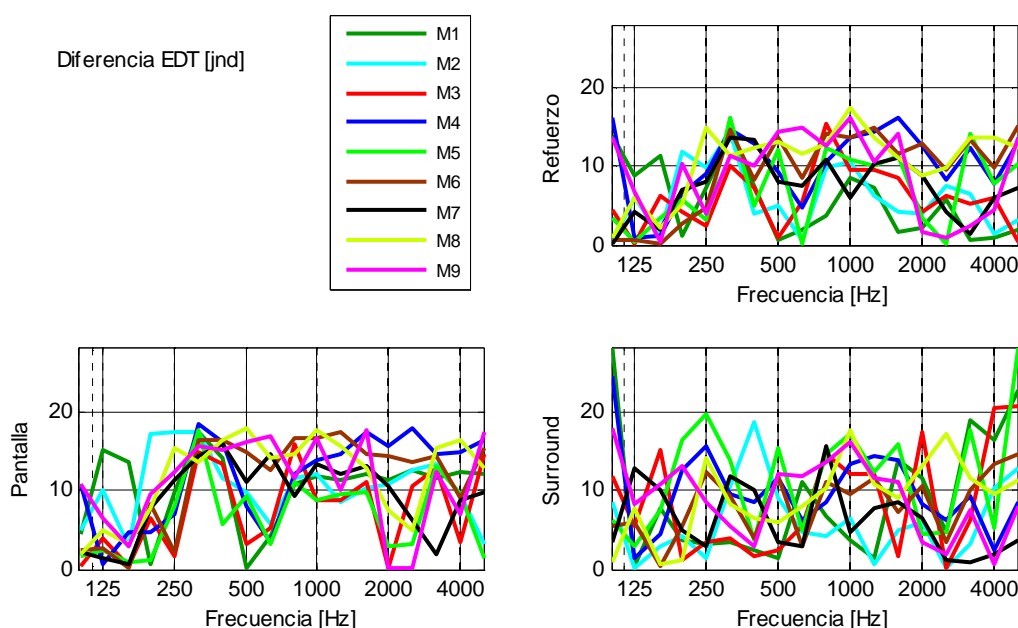


Figura 179. Diferencias entre promedios por micrófono: EDT

Por tanto, el sistema de refuerzo sonoro proporciona menor sensación de reverberación que la fuente omnidireccional, especialmente acusada para los canales de pantalla. Esto será adecuado para la escucha correcta de una película ya que por

los canales de pantalla llegará la voz de los actores y por el surround el sonido ambiente que debe tener mayor sensación de reverberación.

### 8.2.3. Claridad

C80 presenta valores especialmente altos en los promedios realizados con el conjunto de altavoces de pantalla, lo que indica mayor claridad o nitidez de la sala. Las diferencias con el promedio de la fuente omnidireccional alcanzan más de 7 JND en la frecuencia de 315 Hz y superan 1 JND en todas las bandas menos 630 Hz. Mirando los valores obtenidos con los canales de surround, éstos son muy similares a los de la fuente omnidireccional con diferencias inferiores a 2 JND en la mayoría de las bandas como se aprecia en la Figura 180.

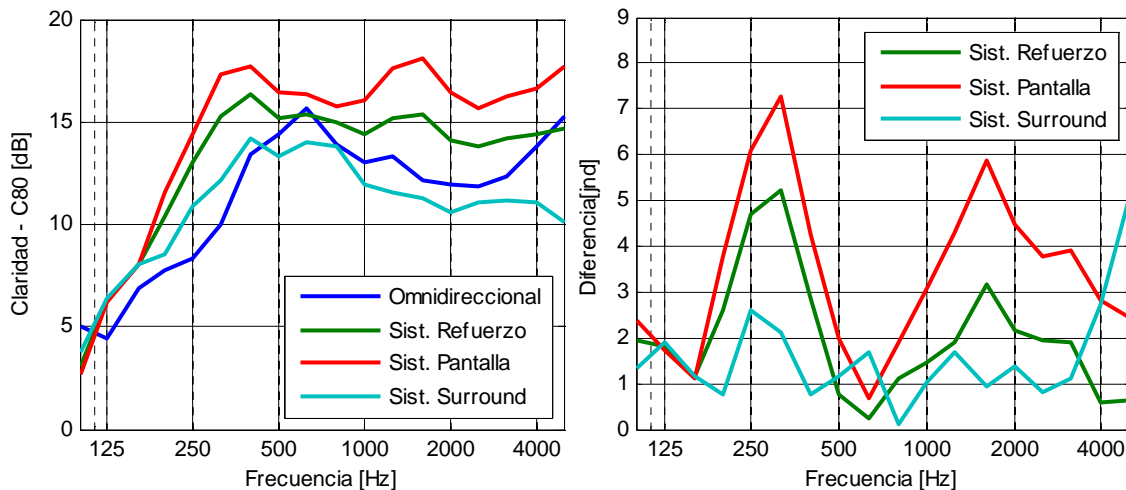


Figura 180. Valores y diferencias entre promedios de la sala: C80

En el análisis por posición de fuente, la posición F3 presenta valores inferiores a F1 y F2 con diferencias que superan los 5 dB en algunas bandas. Mientras que F1 y F2 apenas presentan diferencias. Dentro de los canales de pantalla, de nuevo C y L presentan valores más parecidos a R, pero las diferencias en este parámetro no son tan acusadas como en EDT. En cuanto a los canales de surround, el canal LS presenta valores más altos que el canal RS, que toma valores inferiores al resto de posiciones a partir de 400 Hz.

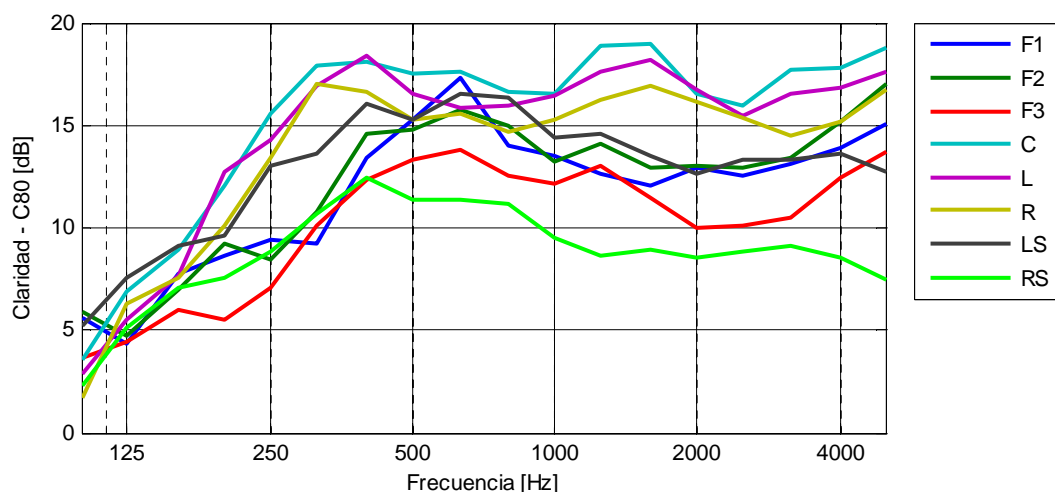


Figura 181. Valores de los promedios por fuente: C80

Como se aprecia en la Figura 182, las posiciones con menores diferencias para los canales de pantalla son las de mayores diferencias presentan con los canales de surround. Por ejemplo, M7 y M9 muestran diferencias menores a 4 JND en frecuencias medias y altos para el surround frente a diferencias superiores a 3 JND para los canales de pantalla. Lo contrario ocurre con la posición M2 con menores diferencias para los canales de pantalla que para los surround.

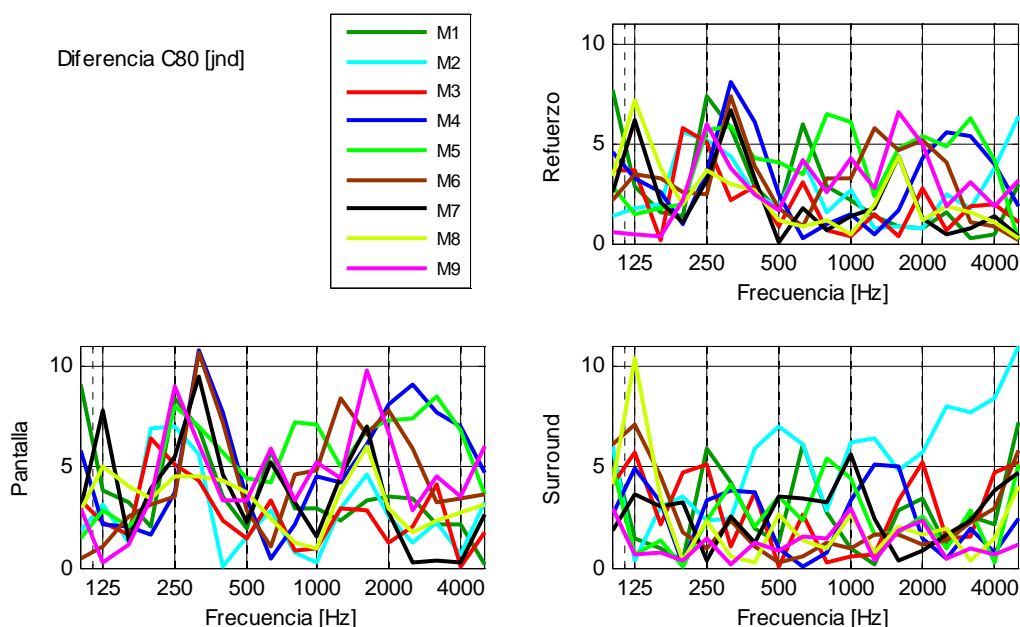


Figura 182. Diferencias entre promedios por micrófono: C80

Al igual que ocurría con los valores de EDT, los valores de C80 obtenidos con los altavoces de pantalla son mejores, hablando en términos de nitidez para la palabra,

que los obtenidos con la fuente omnidireccional. Pero las diferencias entre la fuente omnidireccional y el sistema de surround son pequeñas. Hay que resaltar que las posiciones en la parte derecha de la sala (F3, R y RS) toman valores más bajos que los de la parte izquierda (F1, L y LS).

### 8.2.4. Definición

D50 presenta valores muy similares para ambas mediciones, especialmente a partir de 400 Hz donde las diferencias son inferiores a 2 JND (0,1). Los canales de pantalla ofrecen mejores valores para la Definición, superiores a 0,9 a partir de 250 Hz. En cambio los canales de surround dan resultados inferiores a 0,9 pero más parecidos a los de la fuente omnidireccional (diferencias inferiores a 1 JND en la mayoría de las bandas).

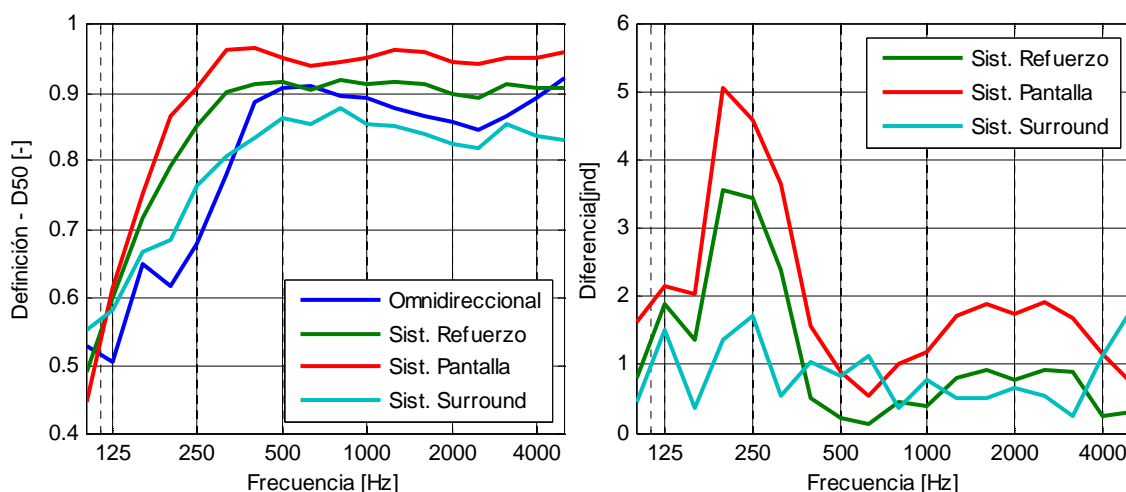


Figura 183. Valores y diferencias entre promedios de la sala: D50

Una vez más, el canal RS da unos resultados muy distintos a los del resto de las fuentes y el canal R al resto de los canales de pantalla. Estos valores sistemáticamente más bajos para todos los parámetros analizados hasta el momento, pueden llevar a pensar que hay una ligera descompensación entre los canales. Como no es probable esa descompensación, cabe pensar que los puntos no están correctamente elegidos. F1, C, L, R y LS toman valores mayores de 0,9 en bandas superiores a 400 Hz, mientras que con RS los valores son inferiores a 0,8. F2 y F toman valores intermedios como se ve en la Figura 184.

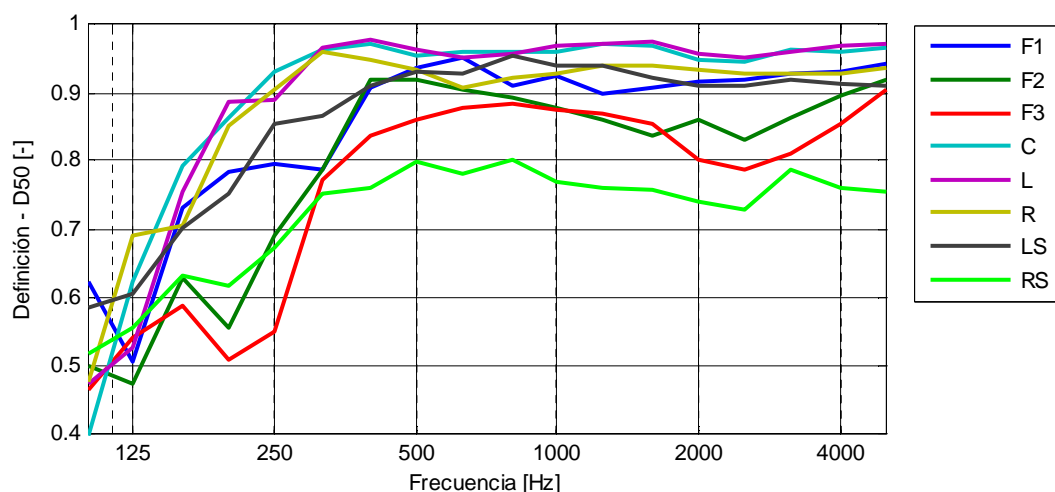


Figura 184. Valores de los promedios por fuente: D50

Si se observan las diferencias por posiciones en la Figura 185, las diferencias entre fuente omnidireccional y los altavoces de pantalla o el sistema de refuerzo completo a partir de 400 Hz son inferiores a 2,5 JND (0,12). Por debajo de esa frecuencia, las diferencias son muy altas y no dependen claramente de la posición de micrófono. En el caso del conjunto de surround, se aprecia que la posición M8 da resultados más desiguales. En cambio, los puntos M6, M7 o M9 no presentan tantas diferencias.

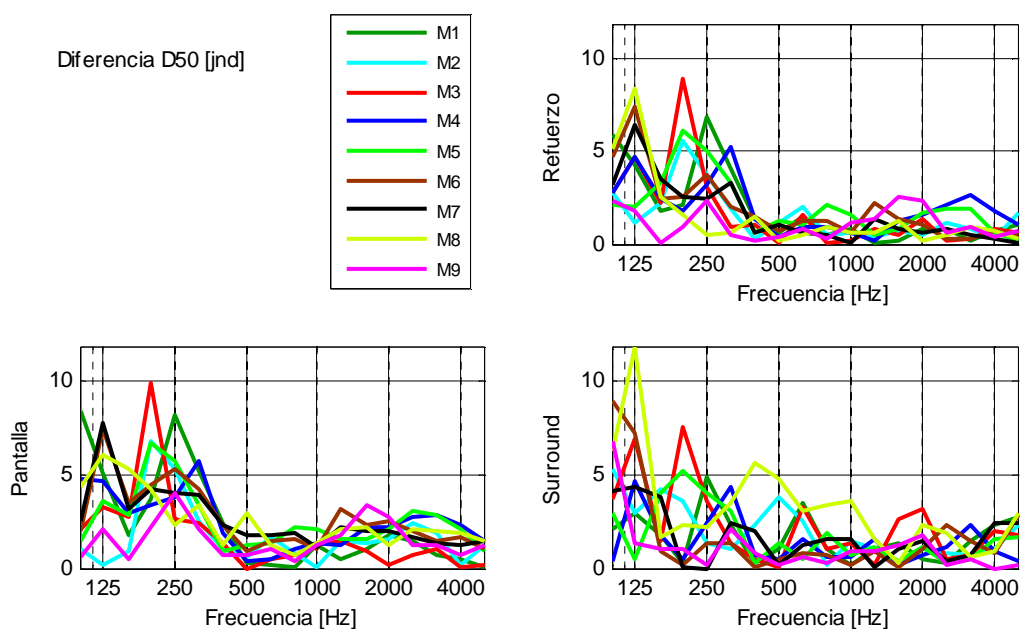


Figura 185. Diferencias entre promedios por micrófono: D50



Los canales de pantalla proporcionan valores de definición más altos a los medidos con una fuente sonora según la norma. Mientras que los canales de surround son comparables a los datos de la norma para frecuencias medias y altas. Esto indica que si se quieren obtener los valores promedios según norma se podrían usar los canales de surround para obtenerlos, donde resultados bastante parecidos.

### 8.2.5. Tiempo central

Las diferencias de los promedios de la sala de Ts son inferiores a 2 JND (20 ms) para todas las bandas y para los conjuntos de altavoces promediados. Los datos obtenidos con fuente omnidireccional son bastante parecidos a los de pantalla en media y alta frecuencia, lo que hace pensar que es posible medir este parámetro con ellos. Los altavoces de surround proporcionan resultados mayores.

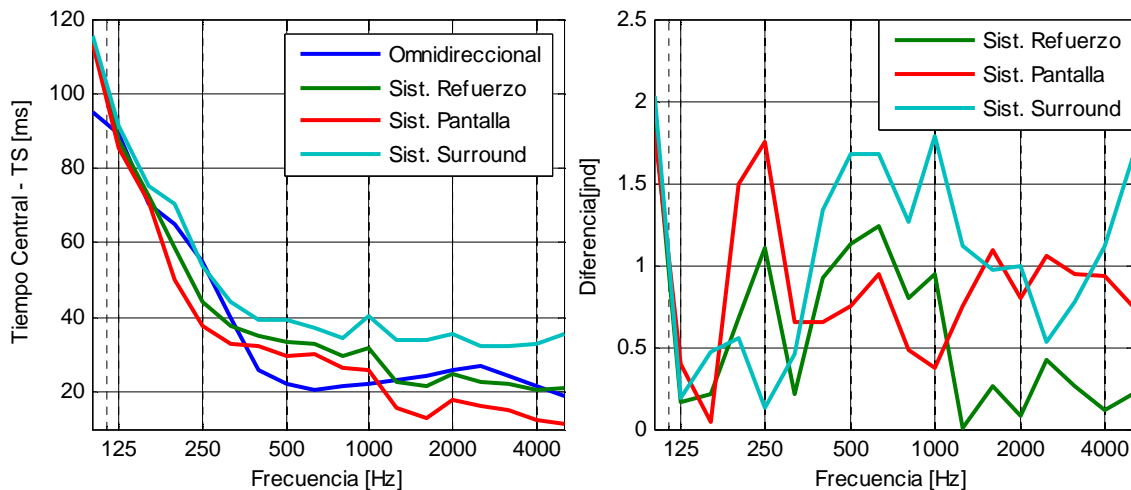


Figura 186. Valores y diferencias entre promedios de la sala: Ts

De nuevo, aparecen los problemas con RS como se aprecia en la Figura 187, los cuales se presentan a partir de la banda de 160 Hz. El resto de fuentes toma valores muy próximos unos a otros y sin diferencias perceptibles.

Prestando atención a los resultados por posiciones (Figura 187), de nuevo aparecen los problemas para M8 y los altavoces de surround. Además de las posiciones M7 y M9 un poco más altas. Para los altavoces de pantalla, las diferencias más grandes con la fuente omnidireccional se producen en los puntos M1 y M2. El resto de posiciones presentan algunas diferencias pero son menores o se reducen a alguna banda concreta.

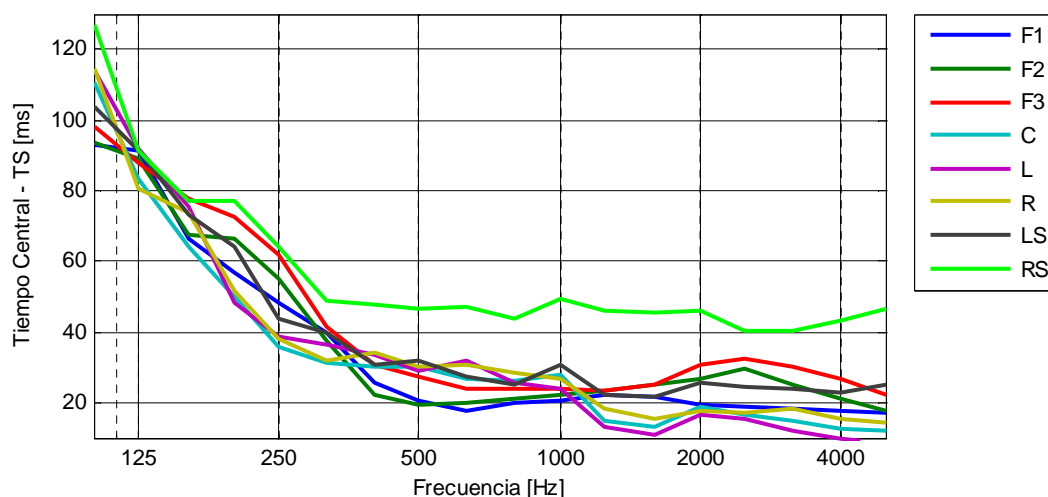


Figura 187. Diferencias entre promedios por fuente: Ts

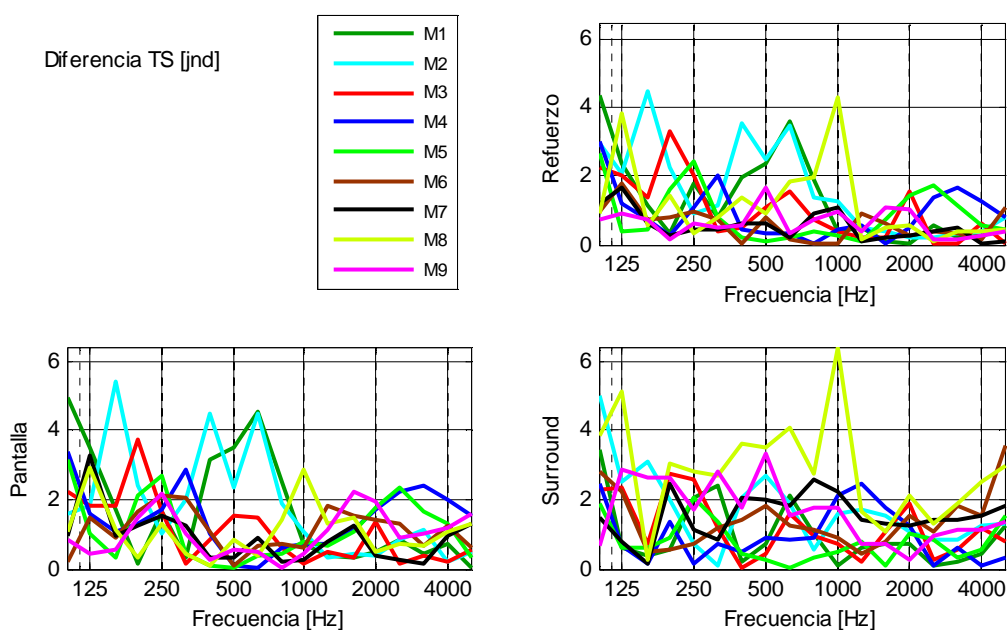


Figura 188. Diferencias entre promedios por micrófono: Ts

No parece absurda la utilización de los altavoces de la sala para la medida de este parámetro ya que las diferencias obtenidas no son excesivamente altas. Las diferencias constantes en las medidas del canal RS indican que es un problema importante y se propondrán posibles soluciones en las conclusiones de este trabajo o en trabajos futuros.

### 8.2.6. Fracción de Energía Lateral

LF presenta valores muy dispares, lo que conlleva muchas diferencias entre promedios por fuentes y posiciones. Si se observan los promedios de la sala, los

altavoces de pantalla hacen que el oyente perciba la fuente mucho más estrecha que con los altavoces de surround (como es lógico) e incluso más estrecha que con la fuente omnidireccional colocada en la parte delantera de la sala. Es decir, la energía que proviene de las reflexiones laterales de la sala y que es captada por el micrófono bidireccional es mucho menor que la recibida directamente de la zona de los altavoces. En cambio, cuando se encienden los altavoces de surround, LF aumenta considerablemente, procediéndose que la respuesta captada por el micrófono bidireccional reciba mayor cantidad de energía que el omnidireccional (LF mayor que 1). Por ello, las diferencias entre los promedios de las medidas son tan diferentes unas de otras.

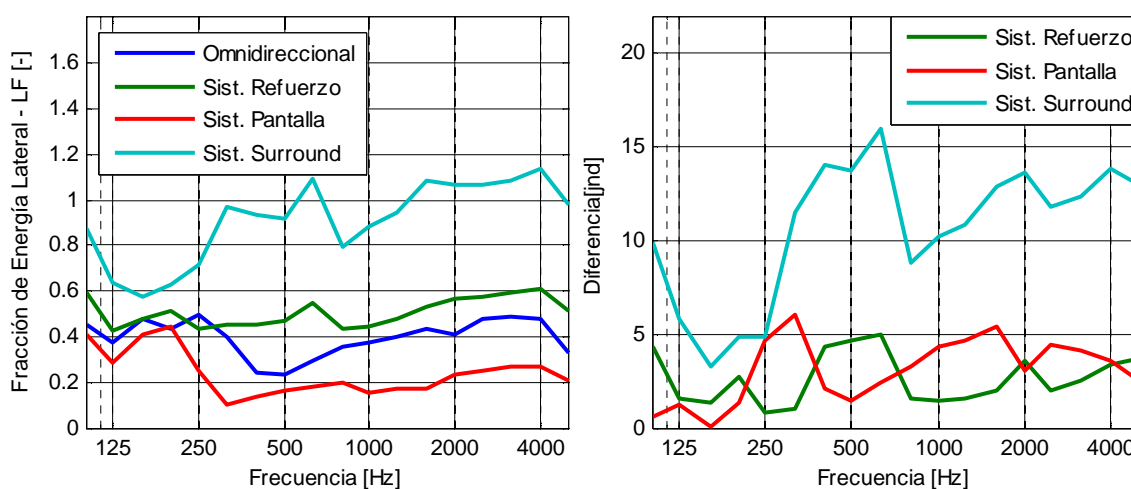


Figura 189. Valores y diferencias entre promedios de la sala: LF

En la Figura 190, se muestra qué ocurre en los promedios por posición de fuente. Al prestar atención a la figura, destacan los valores excesivamente altos para RS. Esto se puede explicar mirando los datos tomados de DIRAC, ya que LF es mayor que 1 en la mayoría de las bandas en todas las posiciones situadas en la parte izquierda de la sala (M1, M6, M7 y M8). Para el otro conjunto de surround (LS), LF no toma valores tan altos (entre 0,6 y 0,8), aún así hay dos posiciones (M1 y M9) en las que DIRAC proporciona valores superiores a 1. Las diferencias entre los altavoces de pantalla o la fuente omnidireccional son pequeñas e inferiores a 0,1 en la mayoría de las bandas.

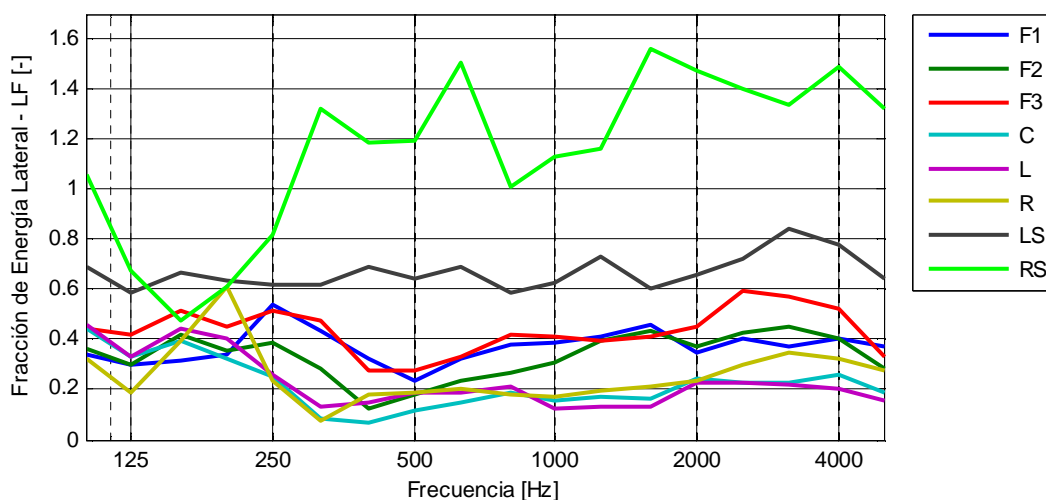


Figura 190. Diferencias entre promedios por fuente: LF

En un análisis por posiciones, no hay ningún punto con diferencias especialmente altas con los altavoces de pantalla. Únicamente la banda de 200 Hz para el M8 y las bandas de 2500 Hz a 4000 Hz para M4 presentan unos valores un poco mayores. Para los altavoces de surround las diferencias se incrementan notablemente, las posiciones traseras (M6, M7, M8 y M9) muestran diferencias muy altas, esto puede deberse a los datos demasiado altos de RS. Por otra parte, el punto M3 es el que menores diferencias presenta.

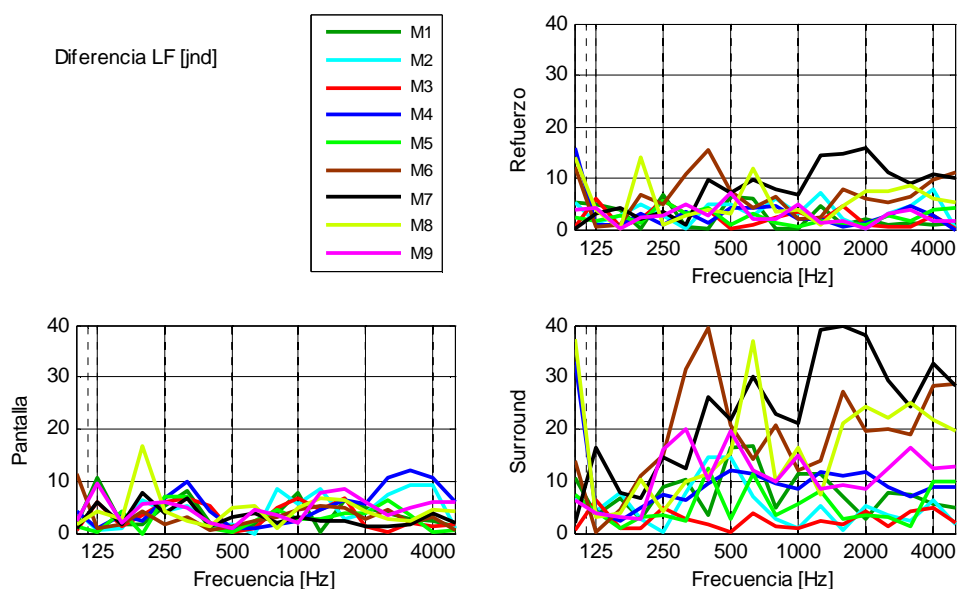


Figura 191. Diferencias entre promedios por micrófono: LF

A la vista de estos resultados, es posible medir LF con los altavoces de pantalla teniendo en cuenta que si se miden con fuente omnidireccional serán un poco

mayores. No son comparables los datos medidos con los altavoces de surround, así que no parece factible la medición de LF con ellos.

## 8.3. Comparación de algunas respuestas al impulso

Se van a comparar visualmente las respuestas al impulso en tres puntos (M3, M5 y M8) de la sala para distintos altavoces. Con ello se pretende mostrar por qué las diferencias en los parámetros son tan grandes. Se han elegido estas tres posiciones por ser:

- la posición que menos problemas ha generado (M3).
- el punto dulce (M5)
- la posición que más problemas ha generado (M8).

El punto M3 está situado en la zona delantera derecha de la sala. Hay algunas diferencias entre las respuestas obtenidas con las fuentes C y F2, pero no son tan claras como las diferencias con RS. La respuesta al impulso de RS comienza con dos picos de igual nivel que por la distancia a la fuente y orientación de los altavoces pueden provenir del surround trasero, ya que de los altavoces laterales llegarán señales reflejadas. Aún así en este punto se calculan correctamente los parámetros.

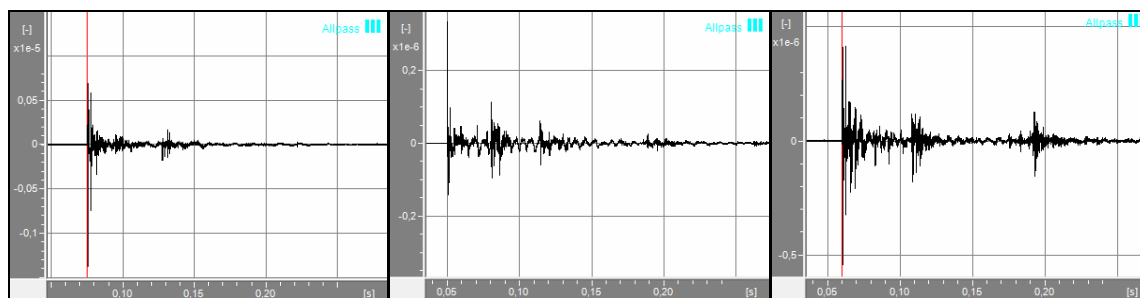


Figura 192. Respuesta al impulso para el punto M3 de los altavoces: C (izquierda), F2 (centro) y RS (derecha)

M5 es el punto de ajuste de la sala y las respuestas al impulso que se consiguen presentan menores diferencias. Si se presta atención a la Figura 193, excepto por cuestiones de nivel, las semejanzas entre las respuestas de C y F2 están claras. Por ejemplo, entre 300 ms y 400 ms de la llegada de la señal directa aparece otro pico en ambas respuestas. Para el canal RS, van llegando sucesivamente una serie

de señales de los distintos altavoces donde las dos señales directas de mayor nivel corresponderán a RS5 y RS6.

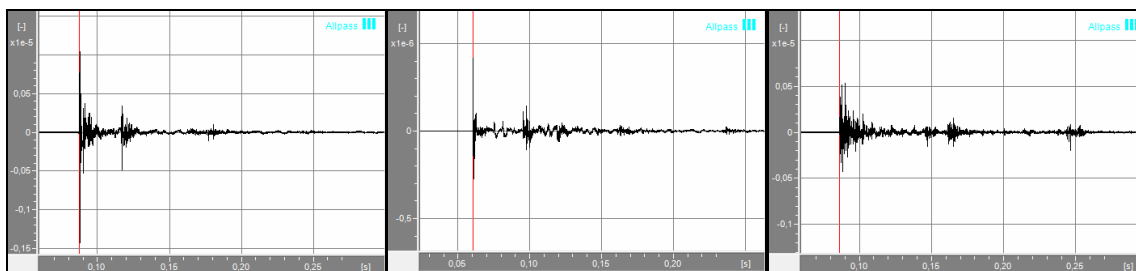


Figura 193. Respuesta al impulso para el punto M5 de los altavoces: C (izquierda), F2 (centro) y RS (derecha)

En el punto M8, las respuesta para los altavoces C y F2 se parecen bastante como se ve en la Figura 194, pero, si comparan estas señales con las de la Figura 195, las diferencias son evidentes. Este punto está situado en una esquina de la sala y cuando emite alguno de los canales de surround llegan las señales directas de los altavoces de manera progresiva, apareciendo una serie de pico seguidos con bastante nivel. Realmente, se convierte en una respuesta a una serie de impulsos emitidos cada uno de ellos desde un altavoz de surround.

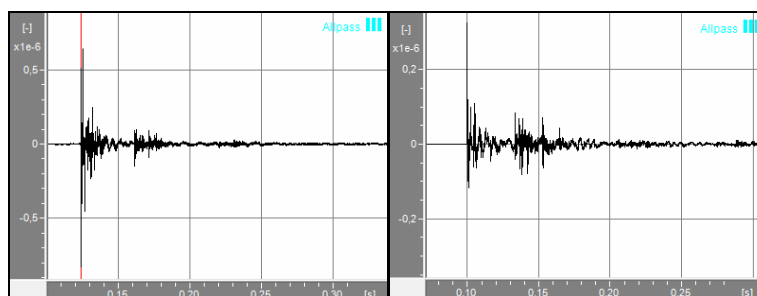


Figura 194. Respuesta al impulso para el punto M8 de los altavoces: C (izquierda) y F2 (derecha)

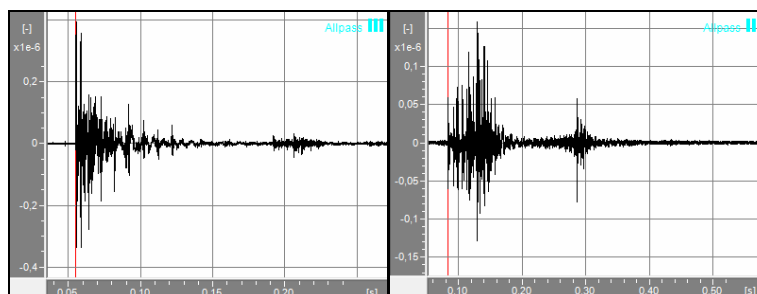


Figura 195. Respuesta al impulso para el punto M8 de los altavoces: LS (izquierda) y RS (derecha)

Por último, debido a los valores extraños que se obtienen para LF con el canal de surround derecho, se van a mostrar las respuestas al impulso de los dos micrófonos en la Figura 196 (omnidireccional - arriba y bidireccional- abajo). Es evidente que las señales son casi iguales, pero el micrófono bidireccional está captando mayor cantidad de energía que el omnidireccional. Debido a esto, la relación de ambas respuestas impulsivas da un valor mayor que 1, aunque se estén tomando márgenes diferentes de integración para evitar la señal directa y las reflexiones de los primeros milisegundos. Estos datos no pueden tomarse como correctos debido a la falta de calibración del sistema electroacústico completo.

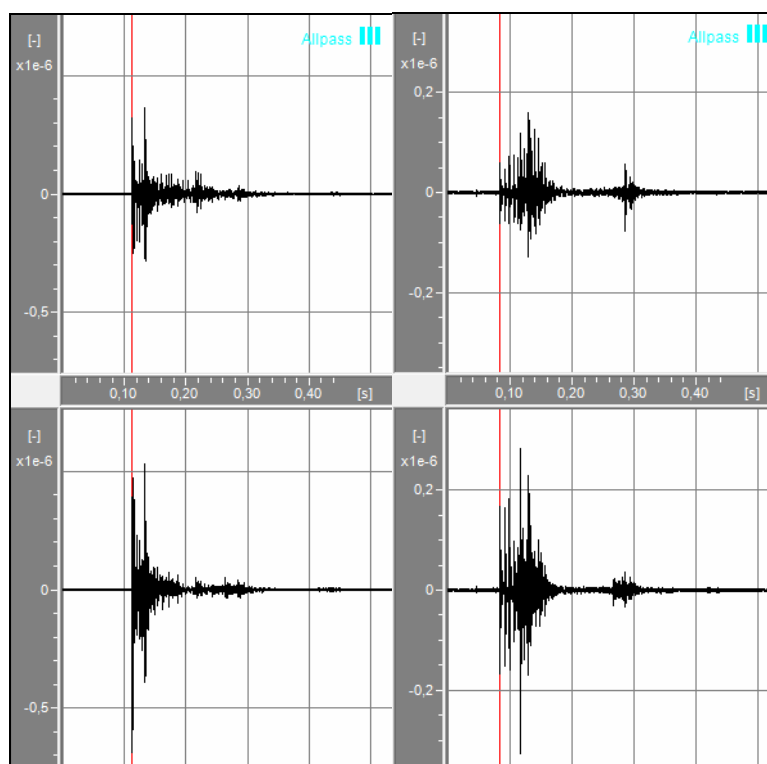


Figura 196. Respuesta al impulso de RS para el punto M1 y M8 para ambos micrófonos





# **9 Conclusiones y líneas futuras de trabajo**



Tras los estudios acústicos y comparativos de los distintos parámetros, ha llegado el momento de extraer una serie de conclusiones a todo el trabajo realizado, así como de plantear algunas posibilidades de trabajos futuros.

Se ha comprobado que los valores de parámetros subjetivos de la sala tienden a ser peores con las fuentes situadas en la parte derecha de la sala frente a la parte izquierda, con diferencias más marcadas con los altavoces de surround. Se ha descartado la posibilidad de que los altavoces de la sala no estén bien ajustados, ya que ocurre lo mismo con la fuente omnidireccional y con la simulación. Es posible que sea necesario incluir algún punto más o recolocar los elegidos. Por ejemplo, se puede añadir una posición de micrófono en la zona trasera derecha de la sala (entre las butacas 9 y 15 de las filas 16 a la 22). Añadiendo un punto en esa zona del modelo de EASE y realizando un cálculo básico, con la herramienta *Standard Mapping* basada en la acústica estadística, C80 pasa de tener diferencias entre 2 dB y 3 dB entre los canales de surround a diferencias inferiores a 1 dB. Por lo tanto, la elección de los puntos de medida no ha sido la óptima.

En cuanto al uso de un tipo u otro de señal de excitación, no se han obtenido diferencias apreciables en los resultados. El barrido sinusoidal proporciona mejores valores de la relación impulso-ruido que la señal MLS y se produce una eliminación de menor número de valores erróneos por el Criterio de Chauvenet. Aunque si se comparan los promedios de la sala, las diferencias sólo son apreciables para EDT para ambas mediciones y T20 y T30 para la medición con refuerzo de la sala. Por ello, se ha optado por utilizar los datos obtenidos con la señal de barrido en la mayoría de los apartados.

Durante la creación del modelo, se han tenido en cuenta las recomendaciones de investigaciones anteriores referentes a la simplificación de la sala, pero el proceso de validación se ha complicado por no conocer los materiales reales ni su distribución. Frente a este problema, el método estadístico no parece una buena solución para conseguir la validación ya que las reflexiones en las distintas superficies son fundamentales en el cálculo de las respuestas impulsivas. Por ello, un planteamiento intermedio en el que se combine la validación estadística y la validación geométrica parece acertado. Se ha conseguido un modelo que responde correctamente en media y alta frecuencias, no así en baja frecuencia. Por lo tanto, se podrían obtener de manera aproximada los distintos parámetros de la sala para esas frecuencias para las distintas configuraciones de fuentes sonoras.

En cuanto a la respuesta del modelo dependiendo del tipo de fuente, el modelo responde correctamente con la fuente omnidireccional, pero al analizar los resultados con el sistema de refuerzo sonoro las diferencias se incrementan notablemente para T20 (en todas bandas) y T30 (por debajo de 500 Hz) y disminuyen para algunos parámetros subjetivos como D50 o C80. Esto plantea la posibilidad de la necesidad del uso o comprobación de otros parámetros subjetivos para dar por validado el modelo, ya que las respuestas impulsivas variarán notablemente entre el uso de unas u otras fuentes.

No se ha podido comprobar la influencia de la distancia entre la fuente y el receptor en los distintos parámetros ni con los datos medidos ni con los datos simulados, ya que dependiendo de la fuente que se use se obtienen resultados muy dispares incluso en aquellos parámetros que parecían tener una influencia clara como C80 o Ts.

En la medición de las respuestas al impulso con el sistema de refuerzo sonoro de la sala, han surgido varios problemas. Uno de ellos ha sido el ruido generado por el ordenador. Ese pequeño ruido emitido por la fuente omnidireccional era casi imperceptible, al emitirlo por 12 altavoces de surround se convierte en un ruido molesto que se escucha en todo momento incluso cuando se estaba emitiendo la señal de barrido o MLS. Además, si se intentaba desconectar el ordenador de la red eléctrica para evitar parte del ruido, se producía una realimentación en el sistema. Así que un posible trabajo futuro sería realizar más mediciones en la misma sala y en otras para comprobar los resultados obtenidos en este trabajo y para ver si se repiten en otras salas.

En cuanto al uso del sistema de refuerzo sonoro para la medida de parámetros, se considera que los datos obtenidos con los canales de pantalla se aproximan bastante a la realidad de la sala. Los valores del tiempo de reverberación medidos con estos canales no distan demasiado de los medidos con fuente omnidireccional, obteniendo resultados mejores para T30 con diferencias inferiores a 3 JND (aproximadamente 90 ms) en el promedio de la sala. Aunque el valle con menores valores de T20 y T30 se desplaza hacia frecuencias inferiores, lo que hace pensar que el tiempo de reverberación no depende únicamente de las características de la sala sino también, aunque en menor medida, de la fuente de excitación. Mientras que los parámetros subjetivos (EDT, C80, D50 y Ts) proporcionan valores mejores en cuanto a nitidez y reverberación, con diferencias que alcanzan 400 ms para EDT y 7 dB para C80. En cuanto a los altavoces de surround, proporcionan mayor reverberación, menor

claridad y definición; aunque los datos obtenidos para C80 y D50 son similares a los medidos con fuente omnidireccional. Por todo esto y por el hecho de que en las sala de cine siempre se utiliza el sistema de refuerzo sonoro, se pueden realizar las medidas de los parámetros acústicos con el sistema de refuerzo sonoro con un margen de error relativamente pequeño excepto para EDT. Teniendo en cuenta que con los altavoces de pantalla, los parámetros subjetivos (EDT, C80, D50 y Ts) proporcionarán mejores resultados y serán más acordes a la percepción de los espectadores en el día a día de la sala. Y con los altavoces de surround se proporcionará el grado de espacialidad necesario.

Hasta el momento no se ha comentado nada de LF, ya que es un parámetro que ha presentado mayores problemas. En primer lugar, se debe colocar el micrófono bidireccional con el eje de menor radiación hacia la posición de la fuente. Cuando se emite con los altavoces de pantalla o la fuente omnidireccional, la posición del oyente sentado se corresponde a la correcta aproximadamente, pero con los altavoces de surround no se puede orientar el micrófono. Se podría buscar una posición intermedia orientando el micrófono hacia la esquina de la sala, pero aún así no sería la orientación “ideal”. Por ello, se ha decidido mantener la posición correspondiente a los oídos del espectador sentado. Por otro lado, no se tenía calibrado todo el sistema electroacústico. Esto ha ocasionado que el micrófono bidireccional captara mayor cantidad de energía que el omnidireccional y los valores de LF fueran superiores a 1 (al 100 %), así que no se pueden tomar los valores obtenidos como correctos. Añadiendo esto a la descompensación de los puntos de medida comentada anteriormente, los resultados obtenidos para el conjunto de altavoces de surround no son comparables ni entre canal derecho e izquierdo ni con los valores simulados. Por tanto, no ha sido factible la obtención de este parámetro con el conjunto completo de los altavoces de surround. Los altavoces de pantalla han proporcionado valores muy bajos de LF debido a la situación, en la pared delantera de la sala, y la gran distancia a al receptor.

En este trabajo se han comparado brevemente las respuestas al impulso de algunas posiciones elegidas para comprobar que al ser tan diferentes daban resultados muy diferentes y resultaban ser peores o mejores posiciones. Este análisis de manera más exhaustiva podría servir para proponer algunas alternativas en la elección de puntos mejores o peores en salas de cine, marcando en cierta manera los puntos negros de la sala. Además, una comparación con las respuestas impulsivas

obtenidas en la simulación podría llevar a un mejor ajuste del modelo. Todo esto podría llevarse a cabo en trabajos futuros.

Con los valores de los parámetros obtenidos, se puede concluir que la sala es muy seca, ya que los tiempos de reverberación son bajos. Además muestra unos niveles altos de Claridad y Definición así como una sensación de reverberación percibida muy baja. Todo esto ayuda a que la sala sea apta para su uso habitual (sala de cine).

En los últimos años, se han empezado a utilizar las salas de cines con propósitos distintos a los que estaban diseñados como pueden ser la retransmisión de operas o de conciertos e incluso espectáculos en vivo. Para el primer caso, el carácter seco de esta sala será idóneo siempre y cuando la mezcla esté preparada para sonido multicanal ya que se reproducirá la acústica del recinto de origen. En el segundo caso, dependerá del tipo de espectáculo ya que si incluye música en directo se recomiendan valores más altos de T30 o EDT y valores inferiores de D50 o C80, por lo que la sala a priori no resultaría adecuada. Un estudio detallado de todos los parámetros relativos a la calidad musical (como pueden ser la calidez o el brillo) podría plantearse como una línea de investigación futura.

# **10**

## **Anexos**





## 10.1. Mediciones y desviación típica calculada según la norma UNE EN-ISO 3382-1

La norma UNE EN-ISO 3382-1 incluye como método de valoración de la incertidumbre el cálculo de la desviación típica del resultado de la medición mediante las ecuaciones (16) incluidas en el apartado 5.1.3. En este anexo se presentan los datos promedio del tiempo de reverberación de la sala junto a su desviación en la Tabla. LXXVI para T20 y la Tabla. LXXVII para T30.

	Omnidireccional		Sist. Refuerzo		Sist. Pantalla		Sist. Surround	
Frec.[Hz]	T20 [s]	$\sigma(T20)$	T20 [s]	$\sigma(T20)$	T20 [s]	$\sigma(T20)$	T20 [s]	$\sigma(T20)$
100	0,970	0,062	0,904	0,044	0,900	0,057	0,909	0,070
125	0,768	0,047	0,801	0,039	0,764	0,047	0,868	0,067
160	0,754	0,041	0,719	0,032	0,702	0,040	0,747	0,052
200	0,694	0,035	0,623	0,026	0,661	0,035	0,562	0,040
250	0,654	0,031	0,609	0,023	0,598	0,029	0,628	0,038
315	0,603	0,027	0,553	0,020	0,531	0,025	0,586	0,032
400	0,576	0,024	0,514	0,017	0,530	0,022	0,489	0,027
500	0,546	0,020	0,582	0,016	0,528	0,020	0,660	0,027
630	0,515	0,017	0,632	0,015	0,616	0,019	0,655	0,024
800	0,542	0,016	0,638	0,013	0,626	0,017	0,657	0,022
1000	0,620	0,016	0,661	0,012	0,613	0,015	0,727	0,020
1250	0,651	0,014	0,645	0,011	0,613	0,014	0,695	0,018
1600	0,724	0,013	0,658	0,010	0,613	0,012	0,721	0,016
2000	0,728	0,012	0,694	0,009	0,668	0,012	0,728	0,014
2500	0,672	0,010	0,691	0,008	0,691	0,011	0,692	0,013
3150	0,656	0,009	0,715	0,007	0,688	0,010	0,751	0,011
4000	0,656	0,008	0,682	0,006	0,667	0,008	0,703	0,010
5000	0,586	0,007	0,668	0,006	0,681	0,007	0,648	0,009

Tabla. LXXVI. T20 promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas

	Omnidireccional		Sist. Refuerzo		Sist. Pantalla		Sist. Surround	
FREC.[Hz]	T30 [s]	$\sigma(T30)$	T30 [s]	$\sigma(T30)$	T30 [s]	$\sigma(T30)$	T30 [s]	$\sigma(T30)$
100	0,943	0,035	0,917	0,026	0,934	0,034	0,892	0,041
125	0,820	0,028	0,846	0,023	0,804	0,028	0,914	0,038
160	0,756	0,025	0,703	0,019	0,696	0,024	0,714	0,030
200	0,691	0,021	0,624	0,015	0,639	0,020	0,601	0,024
250	0,629	0,018	0,605	0,014	0,588	0,017	0,632	0,022
315	0,601	0,016	0,540	0,011	0,535	0,015	0,548	0,018
400	0,581	0,014	0,583	0,011	0,622	0,014	0,524	0,016
500	0,580	0,012	0,614	0,010	0,613	0,013	0,615	0,015
630	0,561	0,011	0,641	0,009	0,641	0,011	0,642	0,014
800	0,570	0,009	0,639	0,008	0,634	0,010	0,646	0,013
1000	0,605	0,009	0,675	0,007	0,660	0,009	0,697	0,012
1250	0,656	0,008	0,694	0,007	0,691	0,009	0,698	0,010
1600	0,670	0,008	0,696	0,006	0,695	0,007	0,698	0,009
2000	0,701	0,007	0,704	0,005	0,707	0,007	0,701	0,008
2500	0,685	0,006	0,697	0,005	0,712	0,006	0,677	0,007
3150	0,670	0,005	0,691	0,004	0,693	0,005	0,688	0,007
4000	0,634	0,005	0,663	0,003	0,680	0,005	0,639	0,005
5000	0,589	0,004	0,645	0,003	0,672	0,004	0,606	0,005

Tabla. LXXVII. T30 promedio de la sala por bandas de tercio de octava

## 10.2. Mediciones e incertidumbre calculada por el método de la GUM

Para el cálculo de la incertidumbre según la GUM, se van a tener en cuenta la desviación estándar de las medidas calculadas en MatLab con la ecuación XX, donde  $n$  es el número de medidas a promediar, y la resolución del equipo de medida que dependerá del parámetro medido (1 ms para T20, T30 o EDT; 0,01 dB para C80; 0,01 para D50 y LF y 0,1 ms para Ts). A partir de estos datos se calcula la incertidumbre combinada o la incertidumbre expandida, como se muestra en la ecuación XXX.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

$$U_{COM} = \sqrt{\left(\frac{resolucion}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sqrt{N}}\right)^2} \quad (18)$$

$$U_{EXP} = k_p U_{COM}$$

En las tablas siguientes se muestran los valores de los distintos parámetros junto con su incertidumbre combinada para los cuatro promedios de sala realizados: promedio de las medidas realizadas con fuente omnidireccional, promedio a partir de los datos de todos los altavoces del sistema de refuerzo sonoro y promedios por conjuntos de altavoces (altavoces de pantalla y altavoces de surround).

	Omnidireccional		Sist. Refuerzo		Sist. Pantalla		Sist. Surround	
FREC.[Hz]	T20 [s]	U <sub>COM</sub>	T20 [s]	U <sub>COM</sub>	T20 [s]	U <sub>COM</sub>	T20 [s]	U <sub>COM</sub>
100	0,768	0,027	0,801	0,026	0,764	0,032	0,868	0,042
125	0,754	0,026	0,719	0,023	0,702	0,023	0,747	0,046
160	0,694	0,031	0,623	0,025	0,661	0,028	0,562	0,042
200	0,654	0,023	0,609	0,027	0,598	0,036	0,628	0,040
250	0,603	0,019	0,553	0,023	0,531	0,023	0,586	0,045
315	0,576	0,009	0,514	0,026	0,530	0,037	0,489	0,034
400	0,546	0,015	0,582	0,034	0,528	0,038	0,660	0,058
500	0,515	0,017	0,632	0,039	0,616	0,051	0,655	0,063
630	0,542	0,016	0,638	0,032	0,626	0,043	0,657	0,051
800	0,620	0,023	0,661	0,032	0,613	0,044	0,727	0,045
1000	0,651	0,018	0,645	0,025	0,613	0,034	0,695	0,036
1250	0,724	0,027	0,658	0,026	0,613	0,037	0,721	0,027
1600	0,728	0,027	0,694	0,024	0,668	0,036	0,728	0,028
2000	0,672	0,017	0,691	0,023	0,691	0,036	0,692	0,019
2500	0,656	0,019	0,715	0,027	0,688	0,043	0,751	0,030
3150	0,656	0,022	0,682	0,028	0,667	0,041	0,703	0,034
4000	0,586	0,023	0,668	0,035	0,681	0,053	0,648	0,038
5000	0,768	0,027	0,801	0,026	0,764	0,032	0,868	0,042

Tabla. LXXVIII. T20 promedio de la sala por bandas de tercio de octava

	Omnidireccional		Sist. Refuerzo		Sist. Pantalla		Sist. Surround	
FREC.[Hz]	T30 [s]	U <sub>COM</sub>	T30 [s]	U <sub>COM</sub>	T30 [s]	U <sub>COM</sub>	T30 [s]	U <sub>COM</sub>
100	0,943	0,026	0,917	0,022	0,934	0,031	0,892	0,029
125	0,820	0,021	0,846	0,023	0,804	0,025	0,914	0,039
160	0,756	0,012	0,703	0,015	0,696	0,019	0,714	0,024
200	0,691	0,015	0,624	0,019	0,639	0,023	0,601	0,034
250	0,629	0,012	0,605	0,020	0,588	0,025	0,632	0,032
315	0,601	0,008	0,540	0,020	0,535	0,026	0,548	0,030
400	0,581	0,008	0,583	0,017	0,622	0,024	0,524	0,017
500	0,580	0,008	0,614	0,017	0,613	0,025	0,615	0,019
630	0,561	0,009	0,641	0,025	0,641	0,038	0,642	0,025
800	0,570	0,012	0,639	0,017	0,634	0,026	0,646	0,021
1000	0,605	0,012	0,675	0,020	0,660	0,031	0,697	0,019
1250	0,656	0,011	0,694	0,012	0,691	0,015	0,698	0,020
1600	0,670	0,010	0,696	0,011	0,695	0,016	0,698	0,012
2000	0,701	0,012	0,704	0,011	0,707	0,013	0,701	0,017
2500	0,685	0,012	0,697	0,011	0,712	0,012	0,677	0,019
3150	0,670	0,011	0,691	0,013	0,693	0,018	0,688	0,019
4000	0,634	0,011	0,663	0,013	0,680	0,017	0,639	0,022
5000	0,589	0,013	0,645	0,017	0,672	0,024	0,606	0,019

Tabla. LXXIX. T30 promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas

	Omnidireccional		Sist. Refuerzo		Sist. Pantalla		Sist. Surround	
FREC. [Hz]	EDT [s]	U <sub>COM</sub>	EDT [s]	U <sub>COM</sub>	EDT [s]	U <sub>COM</sub>	EDT [s]	U <sub>COM</sub>
100	0,731	0,050	0,907	0,052	0,804	0,049	1,063	0,097
125	0,762	0,051	0,669	0,047	0,677	0,056	0,657	0,087
160	0,602	0,038	0,639	0,045	0,622	0,045	0,670	0,099
200	0,611	0,041	0,469	0,050	0,385	0,047	0,622	0,102
250	0,531	0,024	0,350	0,043	0,272	0,041	0,485	0,086
315	0,528	0,032	0,166	0,020	0,099	0,013	0,295	0,029
400	0,422	0,036	0,224	0,031	0,127	0,027	0,379	0,049
500	0,409	0,026	0,232	0,025	0,209	0,032	0,266	0,039
630	0,376	0,023	0,273	0,032	0,210	0,031	0,360	0,057
800	0,532	0,035	0,212	0,023	0,191	0,030	0,249	0,036
1000	0,555	0,043	0,206	0,027	0,184	0,034	0,250	0,046
1250	0,488	0,044	0,214	0,026	0,192	0,035	0,257	0,036
1600	0,499	0,041	0,238	0,029	0,177	0,032	0,341	0,045
2000	0,477	0,033	0,322	0,039	0,271	0,048	0,405	0,062
2500	0,539	0,053	0,379	0,046	0,299	0,050	0,500	0,082
3150	0,467	0,044	0,285	0,039	0,214	0,043	0,401	0,069
4000	0,470	0,045	0,334	0,046	0,229	0,043	0,499	0,086
5000	0,454	0,043	0,340	0,051	0,200	0,042	0,577	0,091

Tabla. LXXX. EDT promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas

	Omnidireccional		Sist. Refuerzo		Sist. Pantalla		Sist. Surround	
FREC.[Hz]	C80 [dB]	U <sub>COM</sub>	C80 [dB]	U <sub>COM</sub>	C80 [dB]	U <sub>COM</sub>	C80 [dB]	U <sub>COM</sub>
100	5,06	0,92	3,10	0,60	2,70	0,77	3,71	0,96
125	4,47	0,77	6,27	0,76	6,21	0,64	6,36	1,69
160	6,92	0,72	8,06	0,67	8,04	0,56	8,09	1,47
200	7,80	0,57	10,39	0,79	11,60	0,60	8,58	1,70
250	8,33	0,49	13,01	0,79	14,41	0,68	10,93	1,61
315	10,03	0,51	15,24	0,63	17,29	0,40	12,16	1,11
400	13,43	0,54	16,31	0,64	17,71	0,57	14,21	1,22
500	14,43	0,46	15,18	0,52	16,44	0,52	13,29	0,89
630	15,65	0,53	15,39	0,54	16,34	0,59	13,95	0,93
800	13,86	0,64	14,97	0,44	15,78	0,42	13,77	0,85
1000	12,98	0,57	14,42	0,48	16,06	0,36	11,97	0,79
1250	13,27	0,40	15,17	0,62	17,56	0,39	11,59	0,93
1600	12,16	0,49	15,32	0,63	18,05	0,35	11,23	0,79
2000	11,98	0,59	14,13	0,60	16,46	0,54	10,62	0,68
2500	11,86	0,58	13,81	0,55	15,63	0,47	11,07	0,83
3150	12,35	0,62	14,23	0,54	16,24	0,45	11,22	0,74
4000	13,81	0,60	14,40	0,58	16,61	0,44	11,08	0,80
5000	15,26	0,58	14,64	0,71	17,69	0,43	10,07	0,87

Tabla. LXXXI. C80 promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas

	Omnidireccional		Sist. Refuerzo		Sist. Pantalla		Sist. Surround	
FREC.[Hz]	D50 [-]	U <sub>COM</sub>	D50 [-]	U <sub>COM</sub>	D50 [-]	U <sub>COM</sub>	D50 [-]	U <sub>COM</sub>
100	0,53	0,05	0,49	0,03	0,45	0,04	0,55	0,05
125	0,51	0,05	0,60	0,03	0,61	0,03	0,58	0,06
160	0,65	0,03	0,72	0,02	0,75	0,02	0,67	0,05
200	0,61	0,04	0,79	0,03	0,87	0,01	0,68	0,06
250	0,68	0,03	0,85	0,02	0,91	0,01	0,76	0,05
315	0,78	0,02	0,90	0,02	0,96	0,00	0,81	0,05
400	0,89	0,01	0,91	0,02	0,97	0,01	0,84	0,04
500	0,91	0,01	0,92	0,02	0,95	0,01	0,86	0,04
630	0,91	0,01	0,91	0,02	0,94	0,01	0,86	0,04
800	0,90	0,01	0,92	0,01	0,95	0,01	0,88	0,03
1000	0,89	0,01	0,91	0,01	0,95	0,01	0,85	0,03
1250	0,88	0,01	0,92	0,01	0,96	0,01	0,85	0,03
1600	0,87	0,01	0,91	0,01	0,96	0,01	0,84	0,03
2000	0,86	0,02	0,90	0,02	0,95	0,01	0,83	0,03
2500	0,85	0,02	0,89	0,02	0,94	0,01	0,82	0,04
3150	0,87	0,02	0,91	0,01	0,95	0,01	0,85	0,02
4000	0,89	0,01	0,91	0,02	0,95	0,01	0,84	0,03
5000	0,92	0,01	0,91	0,02	0,96	0,01	0,83	0,03

Tabla. LXXXII. D50 promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas

	Omnidireccional		Sist. Refuerzo		Sist. Pantalla		Sist. Surround	
FREC.[Hz]	Ts [ms]	U <sub>COM</sub>	Ts [ms]	U <sub>COM</sub>	Ts [ms]	U <sub>COM</sub>	Ts [ms]	U <sub>COM</sub>
100	95,0	4,6	113,9	4,4	113,0	4,3	115,2	9,2
125	89,3	3,9	87,6	3,9	85,3	2,9	91,2	8,8
160	70,6	2,8	72,7	3,2	71,0	3,5	75,3	6,0
200	65,0	2,7	58,3	3,6	50,1	2,2	70,6	7,7
250	55,0	1,9	44,0	3,2	37,5	1,9	53,7	7,0
315	39,6	2,1	37,5	2,7	33,0	3,1	44,2	4,7
400	26,0	1,7	35,2	3,2	32,4	4,3	39,3	4,8
500	22,3	1,4	33,5	2,4	29,8	2,7	39,1	4,0
630	20,4	1,0	32,8	2,9	29,9	3,5	37,2	4,8
800	21,7	0,9	29,7	2,0	26,6	2,1	34,3	3,8
1000	22,2	0,8	31,6	2,7	25,9	2,3	40,1	5,2
1250	22,9	1,3	22,9	2,1	15,4	0,9	34,1	4,0
1600	24,0	1,4	21,3	2,2	13,1	0,8	33,7	3,9
2000	25,7	1,7	24,9	2,2	17,7	1,7	35,6	3,7
2500	27,0	1,7	22,7	1,8	16,4	1,0	32,3	3,0
3150	24,4	1,6	21,8	1,9	15,0	1,1	32,1	3,2
4000	21,8	1,8	20,6	2,3	12,4	0,8	32,9	4,2
5000	19,1	1,4	21,2	2,6	11,6	0,9	35,6	4,8

Tabla. LXXXIII. Ts promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas



	Omnidireccional		Sist. Refuerzo		Sist. Pantalla		Sist. Surround	
FREC.[Hz]	LF [-]	U <sub>COM</sub>	LF [-]	U <sub>COM</sub>	LF [-]	U <sub>COM</sub>	LF [-]	U <sub>COM</sub>
100	0,45	0,08	0,60	0,10	0,41	0,04	0,88	0,23
125	0,38	0,05	0,42	0,06	0,28	0,04	0,63	0,12
160	0,48	0,07	0,47	0,04	0,41	0,05	0,57	0,07
200	0,44	0,05	0,52	0,08	0,44	0,13	0,62	0,09
250	0,50	0,05	0,44	0,06	0,25	0,04	0,72	0,12
315	0,40	0,04	0,45	0,10	0,10	0,01	0,97	0,18
400	0,24	0,05	0,46	0,11	0,13	0,03	0,94	0,22
500	0,23	0,03	0,47	0,09	0,16	0,03	0,92	0,18
630	0,30	0,03	0,55	0,12	0,18	0,02	1,10	0,25
800	0,36	0,04	0,43	0,08	0,19	0,03	0,80	0,16
1000	0,37	0,05	0,44	0,09	0,15	0,02	0,88	0,17
1250	0,40	0,04	0,48	0,10	0,17	0,02	0,94	0,20
1600	0,44	0,04	0,53	0,12	0,17	0,02	1,08	0,26
2000	0,41	0,04	0,57	0,11	0,23	0,03	1,07	0,22
2500	0,47	0,04	0,58	0,10	0,25	0,03	1,06	0,20
3150	0,49	0,05	0,60	0,10	0,27	0,03	1,09	0,21
4000	0,48	0,06	0,61	0,11	0,26	0,03	1,14	0,24
5000	0,33	0,04	0,52	0,10	0,21	0,03	0,98	0,21

Tabla. LXXXIV. LF promedio de la sala por bandas de tercio de octava para las mediciones realizadas

Por último, en la Tabla. LXXXV, se muestran los valores globales con sus incertidumbres combinadas.

	Omnidireccional		Sist. Refuerzo		Sist. Pantalla		Sist. Surround	
Parámetro	Valor	$U_{COM}$	Valor	$U_{COM}$	Valor	$U_{COM}$	Valor	$U_{COM}$
$T_{20_{med}}$ [s]	0,574	0,008	0,612	0,048	0,587	0,046	0,648	0,051
$T_{30_{med}}$ [s]	0,592	0,005	0,641	0,050	0,643	0,051	0,637	0,050
$EDT_m$ [s]	0,465	0,015	0,227	0,018	0,185	0,015	0,298	0,023
$C80_m$ [dB]	13,94	0,22	15,24	1,20	16,65	1,31	13,13	1,03
$D50_m$ [-]	0,90	0,01	0,91	0,07	0,95	0,08	0,86	0,07
$Ts_m$ [ms]	22,6	0,5	30,9	2,4	26,7	2,1	37,1	2,9
$LF_m$ [-]	0,38	0,02	0,48	0,04	0,24	0,02	0,83	0,07

Tabla. LXXXV. Valores globales junto a sus incertidumbres

## 10.3. Gráficas del estudio comparativo

En este anexo se incluyen las representaciones gráficas de los promedios realizados tanto para las simulaciones como para las mediciones en una sola figura, para una comparación visual de los resultados. Se comenzará incluyendo los promedios de sala, los promedios por fuente y los promedios por posición de micrófono (que presenten mayores diferencias).

### 10.3.1. Comparación mediciones y simulación

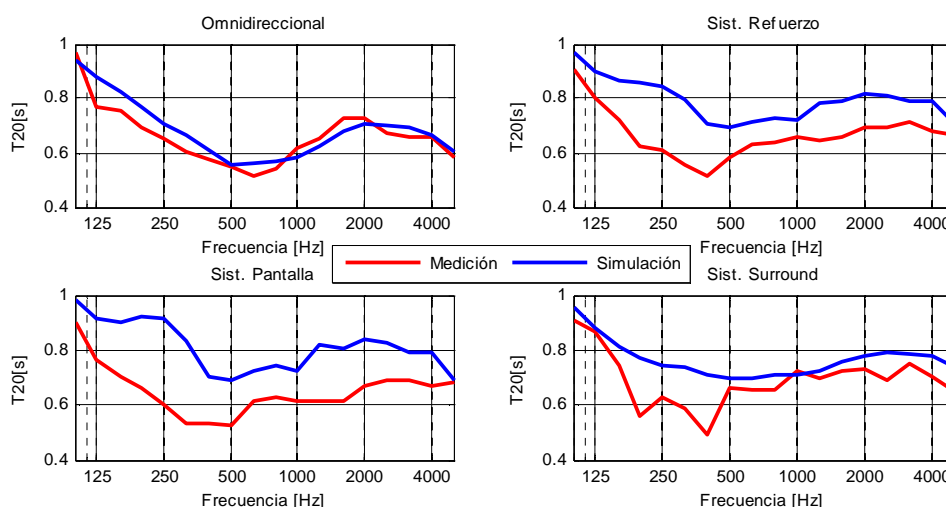


Figura 197. Promedios de sala de mediciones y simulación: T20

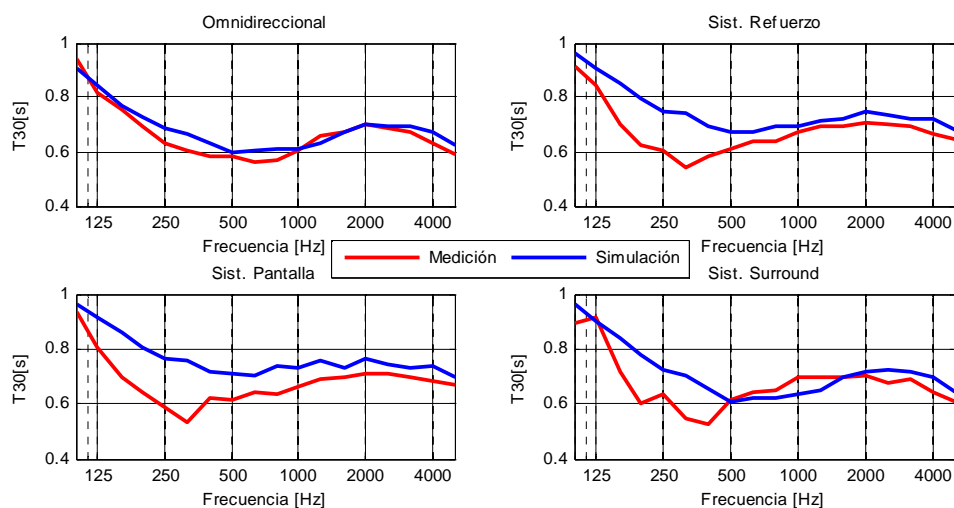


Figura 198. Promedios de sala de mediciones y simulación: T30

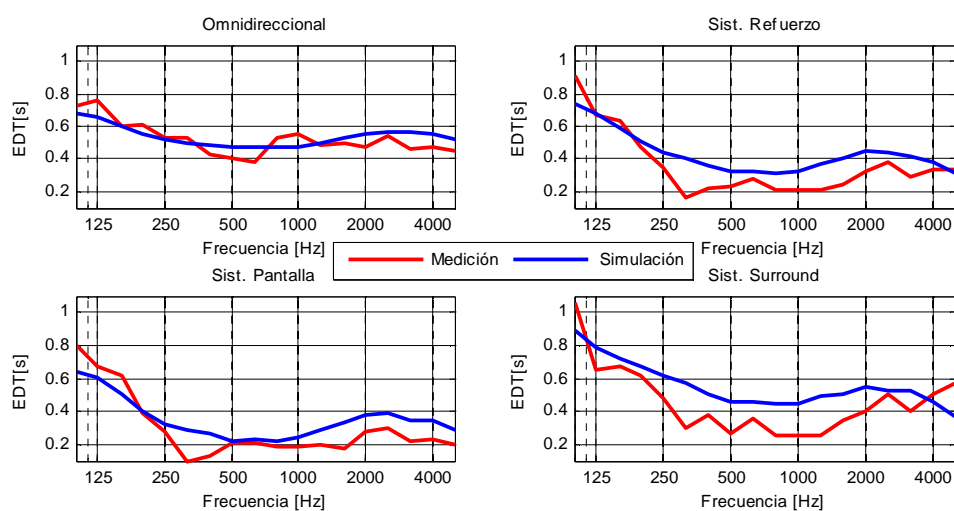


Figura 199. Promedios de sala de mediciones y simulación: EDT

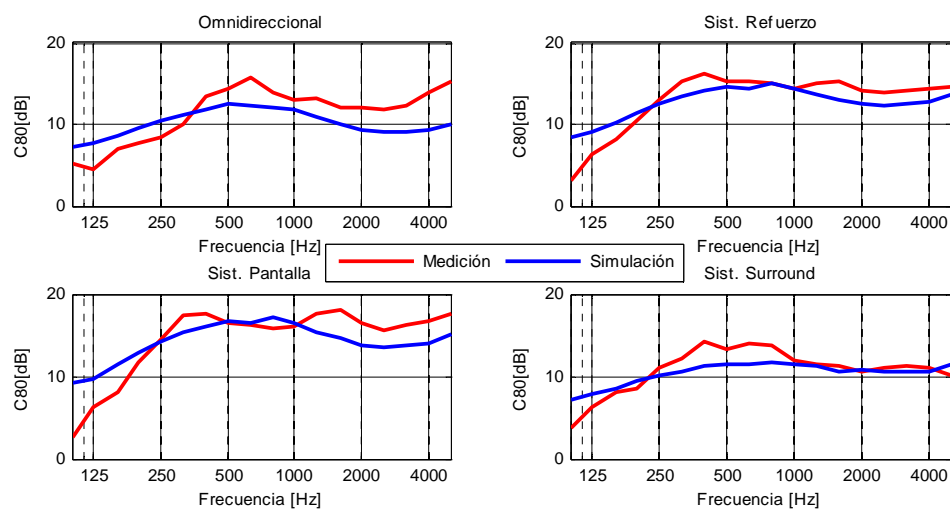


Figura 200. Promedios de sala de mediciones y simulación: C80

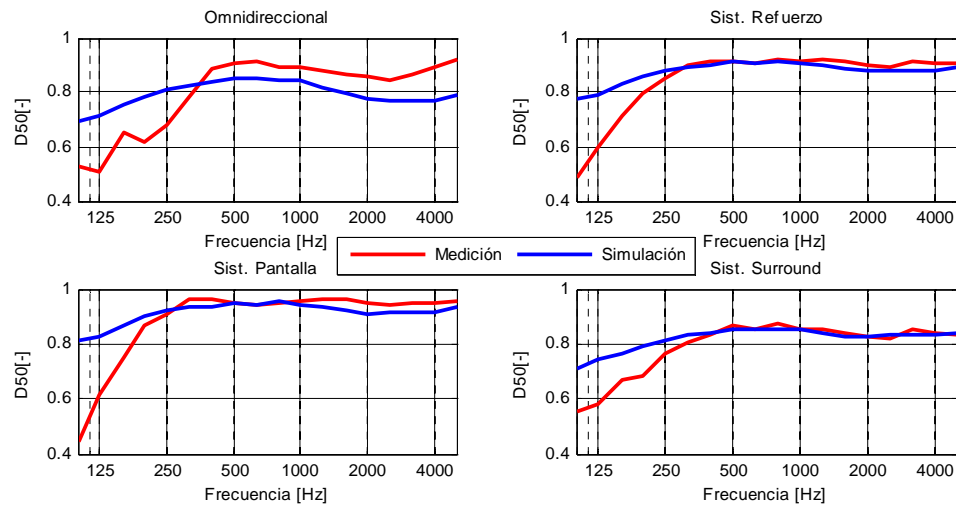


Figura 201. Promedios de sala de mediciones y simulación: D50

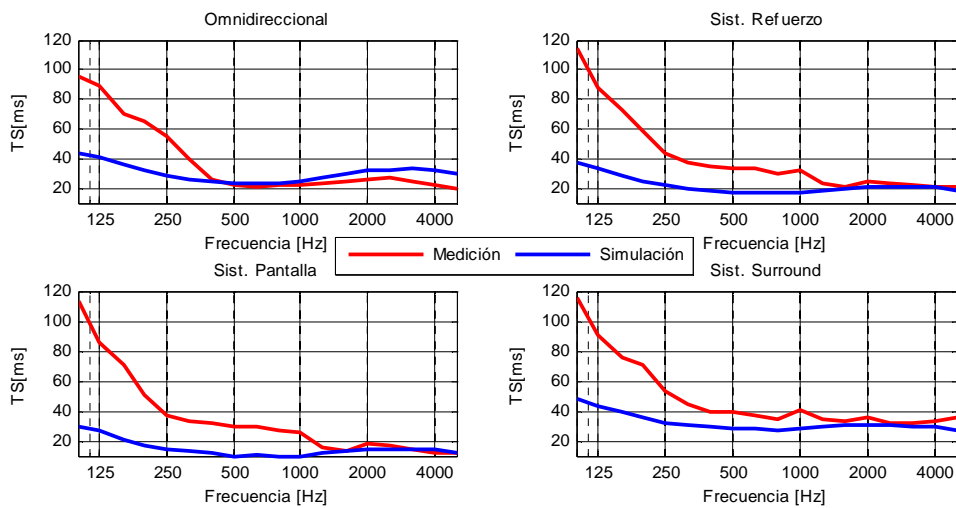


Figura 202. Promedios de sala de mediciones y simulación: Ts

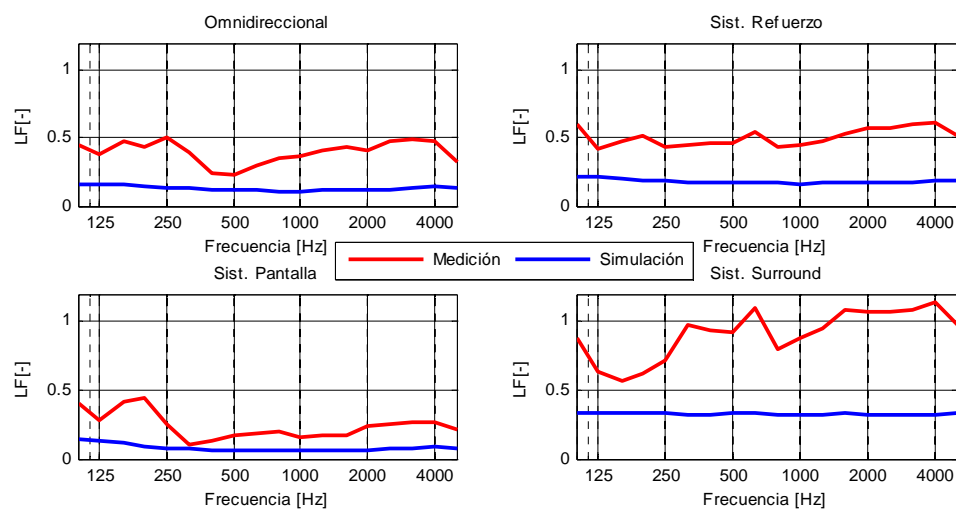


Figura 203. Promedios de sala de mediciones y simulación: LF

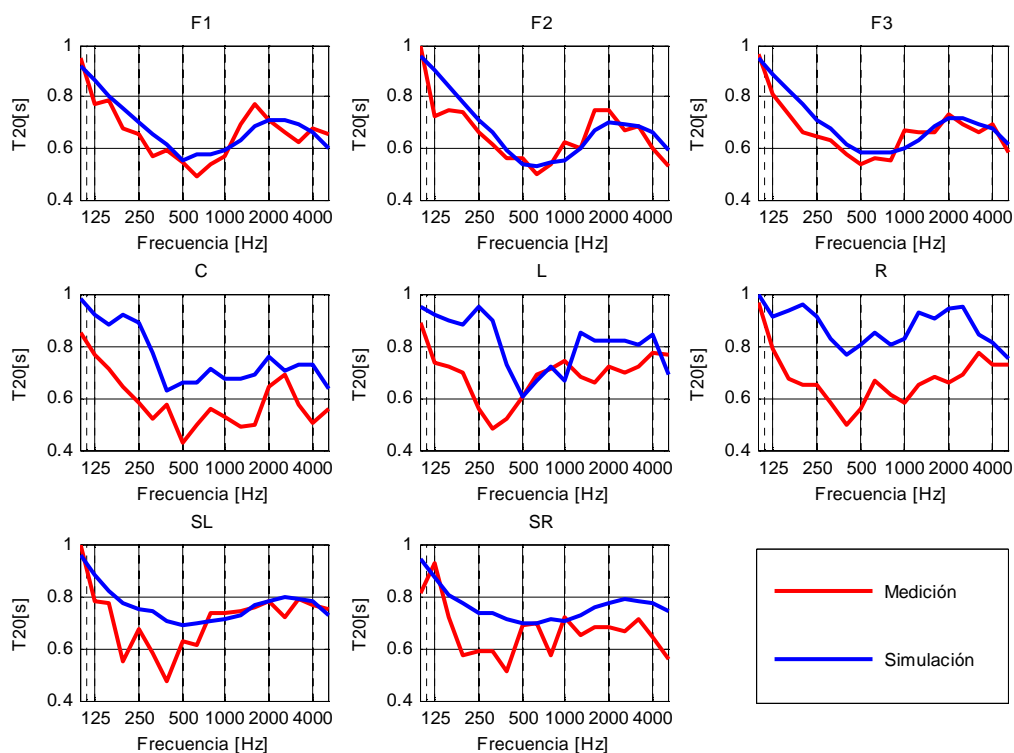


Figura 204. Promedios por fuente de mediciones y simulación: T20

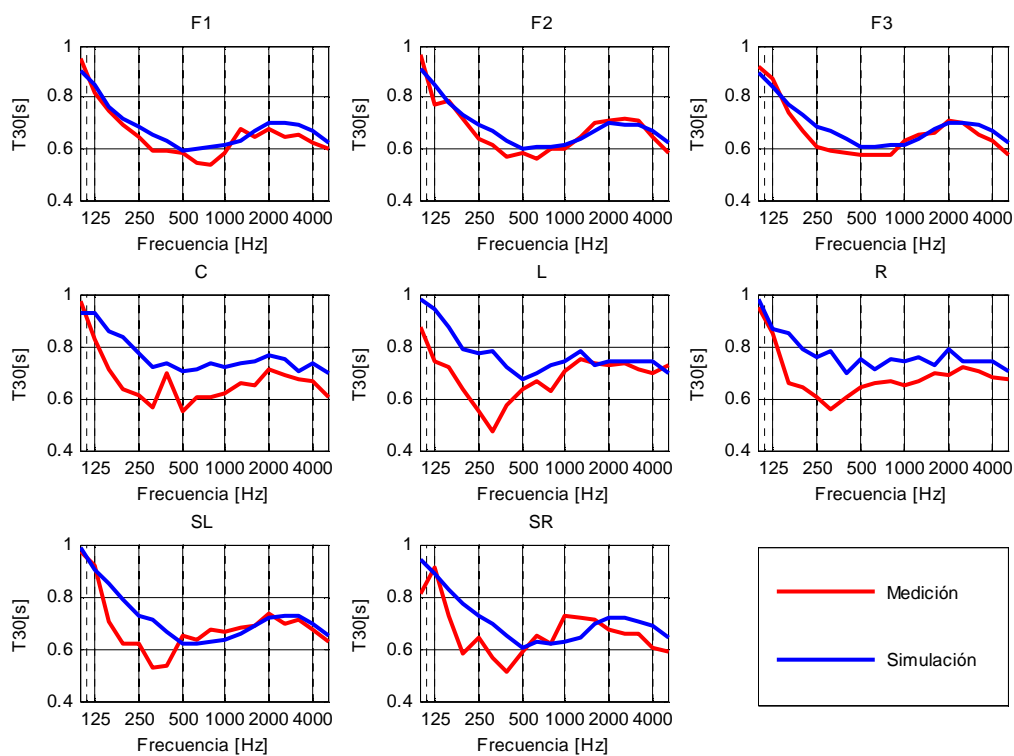


Figura 205. Promedios por fuente de mediciones y simulación: T30

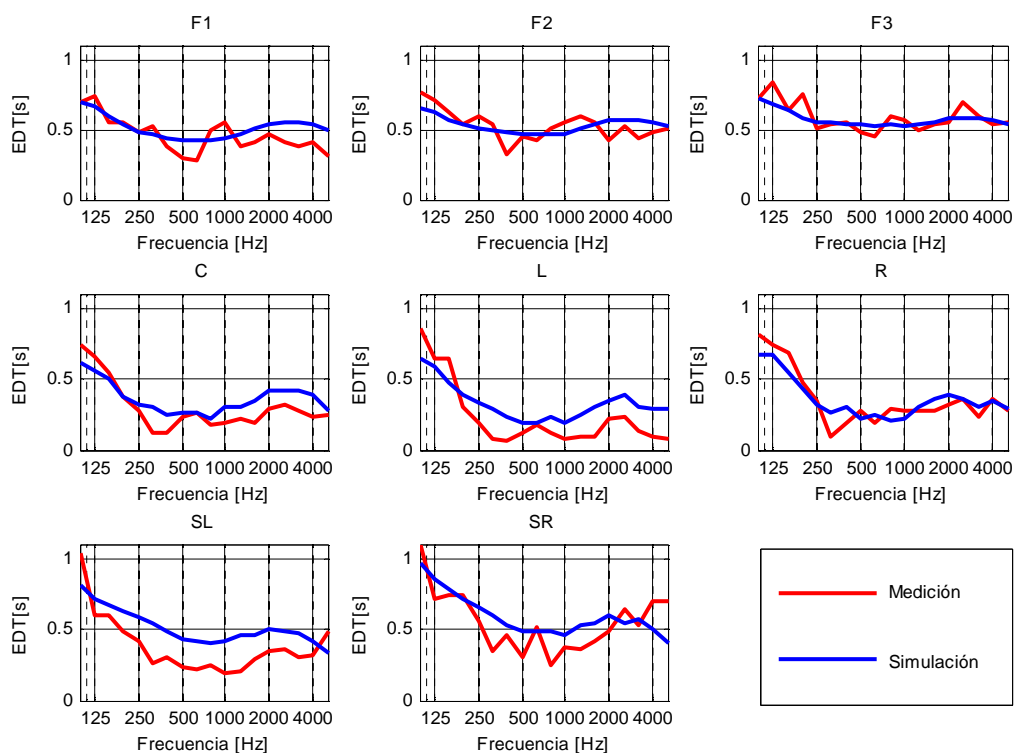


Figura 206. Promedios por fuente de mediciones y simulación: EDT

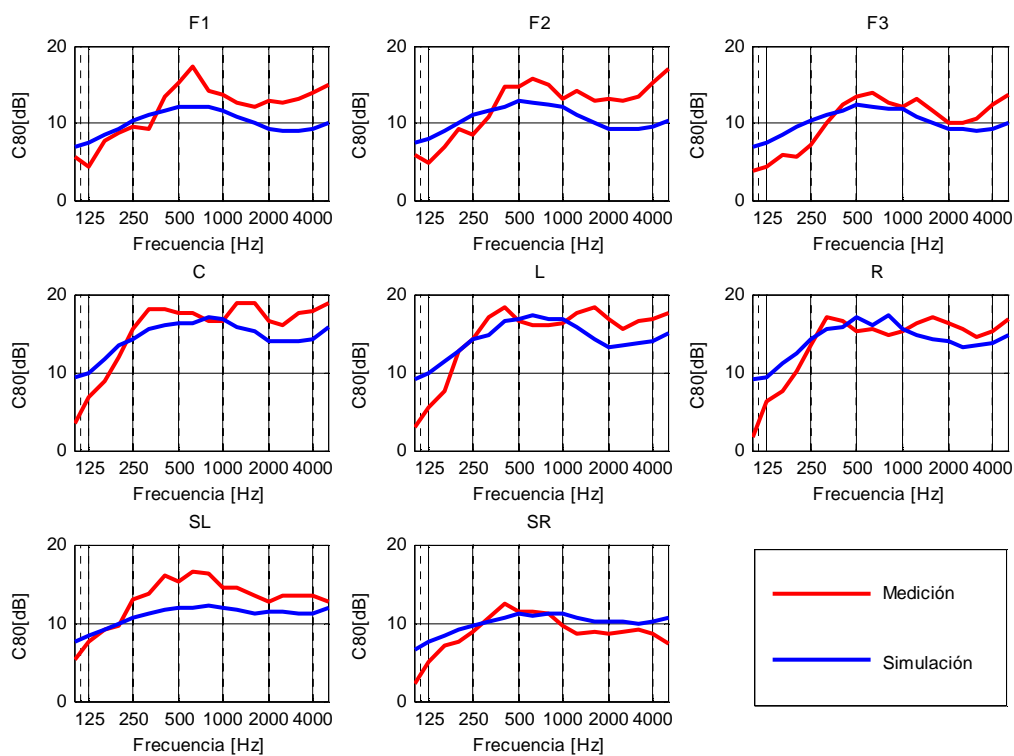


Figura 207. Promedios por fuente de mediciones y simulación: C80

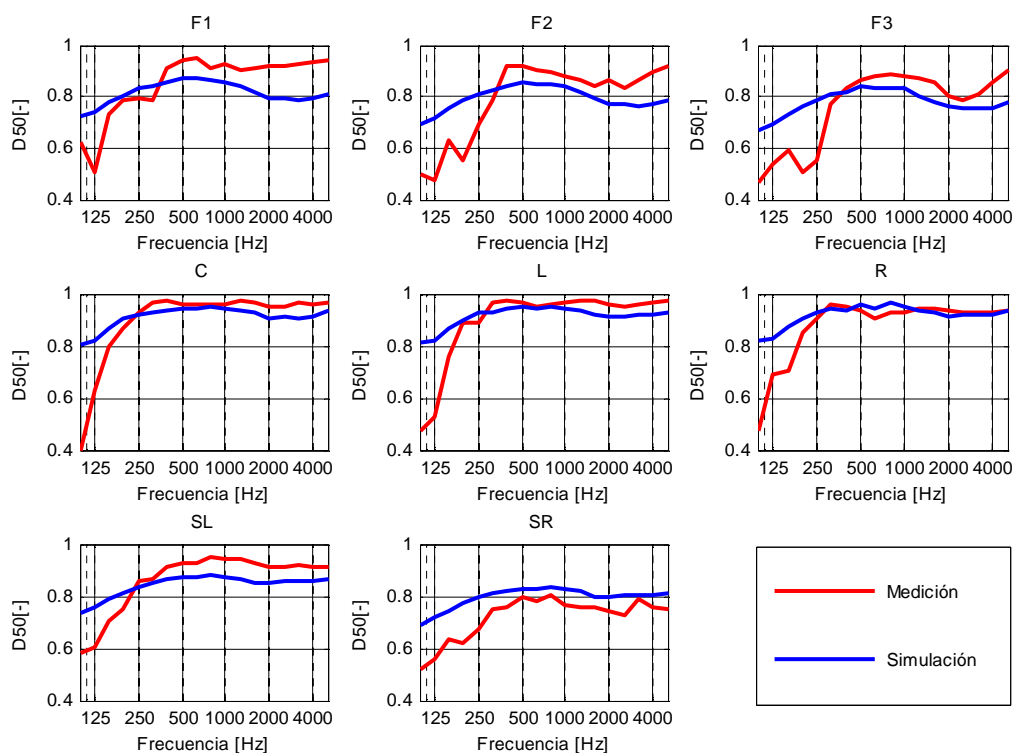


Figura 208. Promedios por fuente de mediciones y simulación: D50

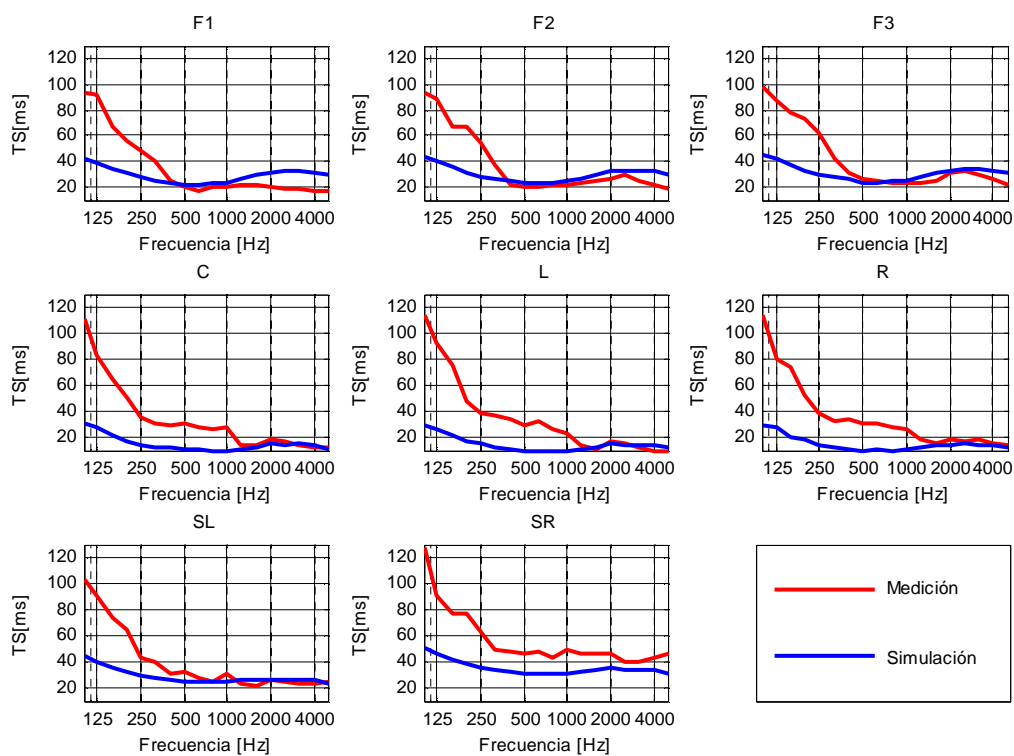


Figura 209. Promedios por fuente de mediciones y simulación: Ts

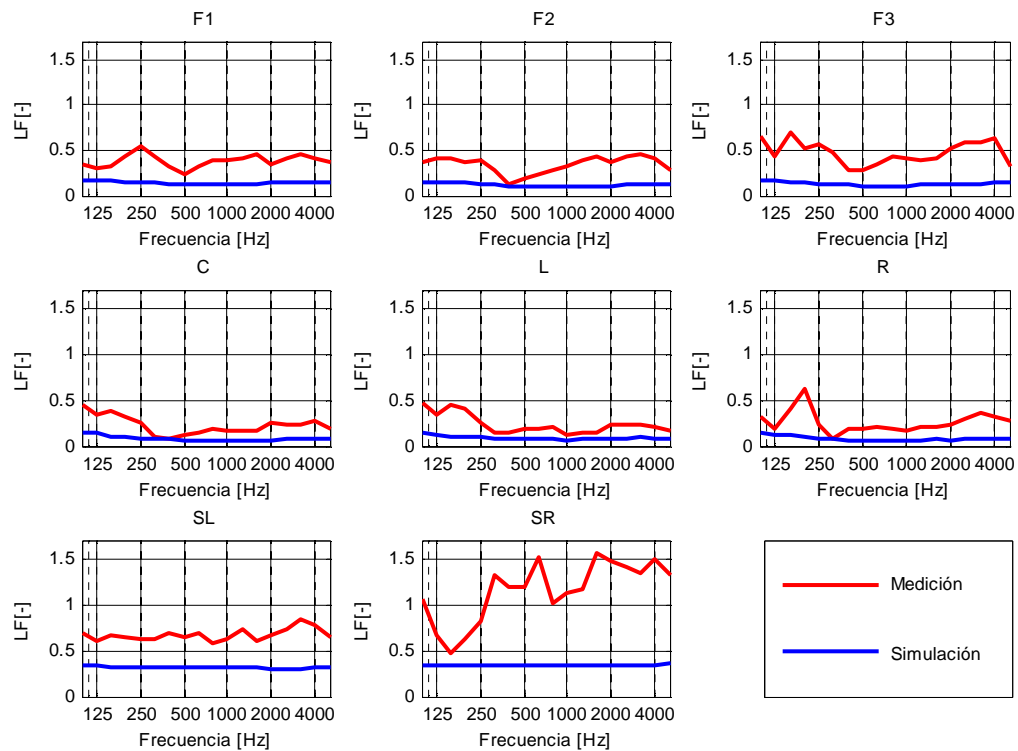


Figura 210. Promedios por fuente de mediciones y simulación: LF

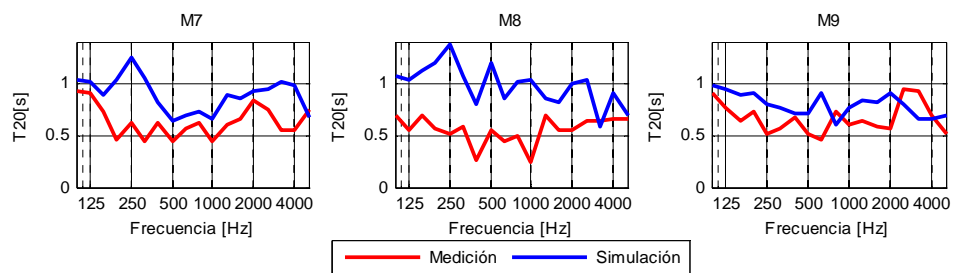


Figura 211. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Pantalla): T20

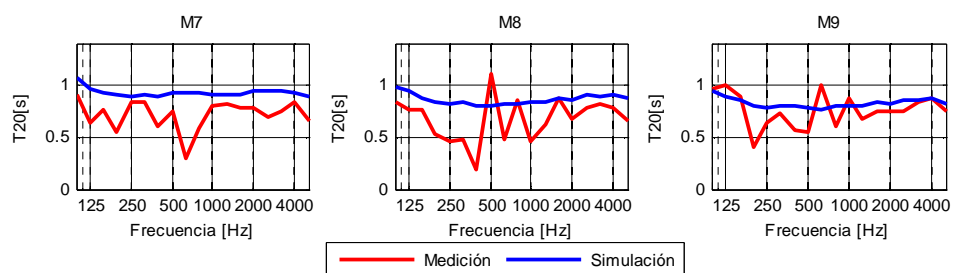


Figura 212. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): T20



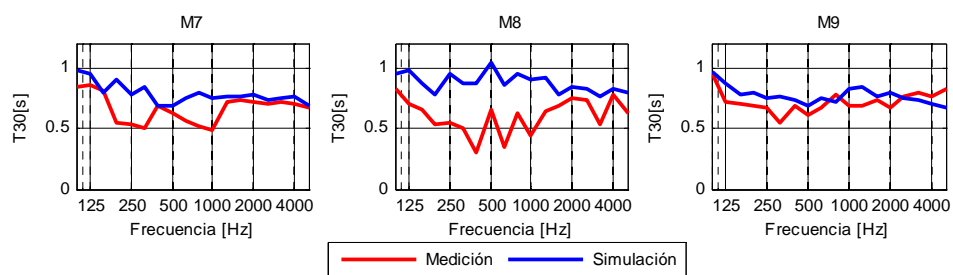


Figura 213. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Pantalla): T30

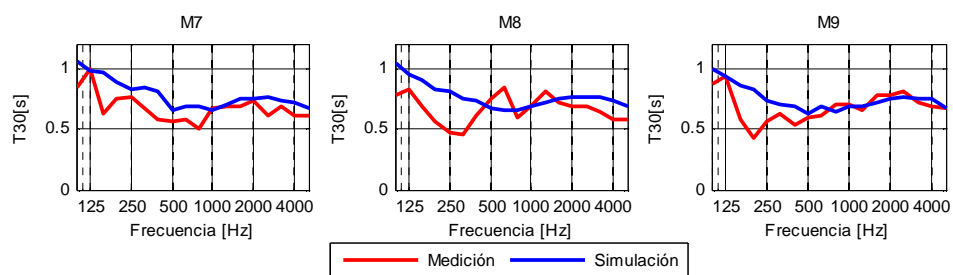


Figura 214. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): T30

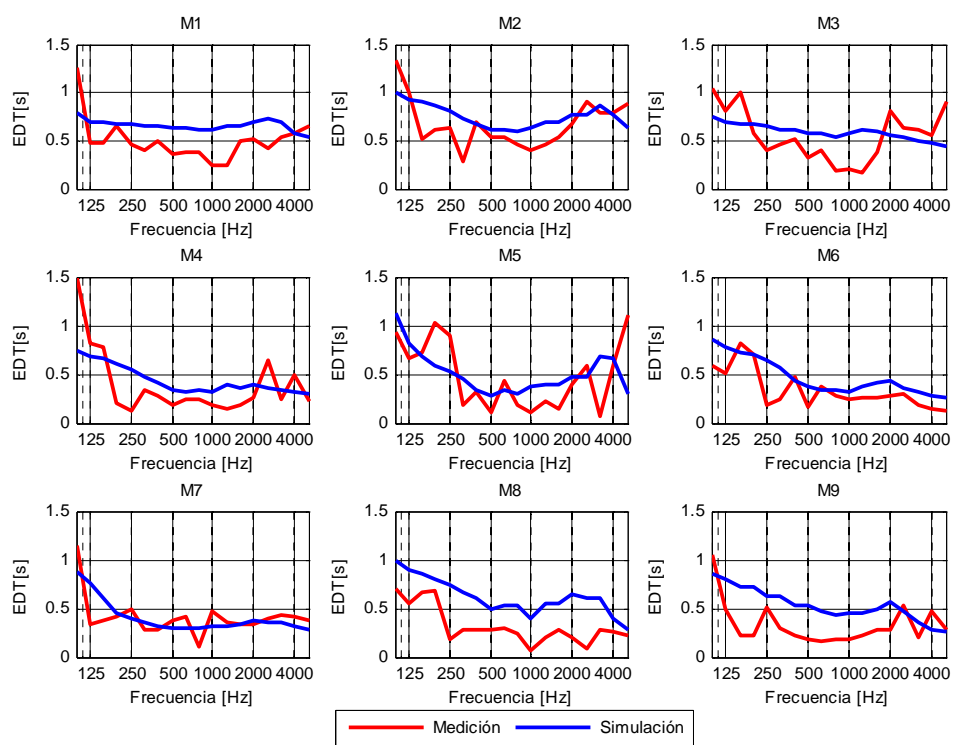


Figura 215. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround):

EDT

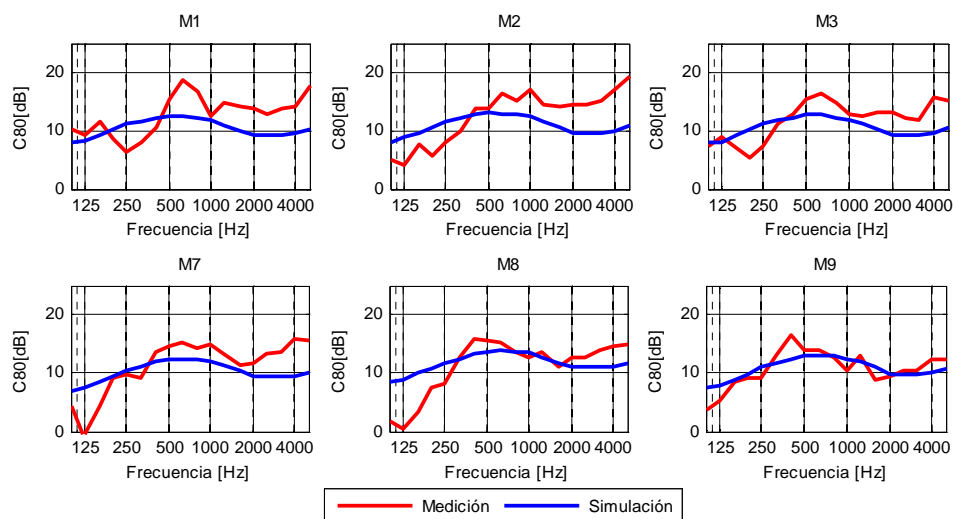


Figura 216. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Omnidireccional): C80

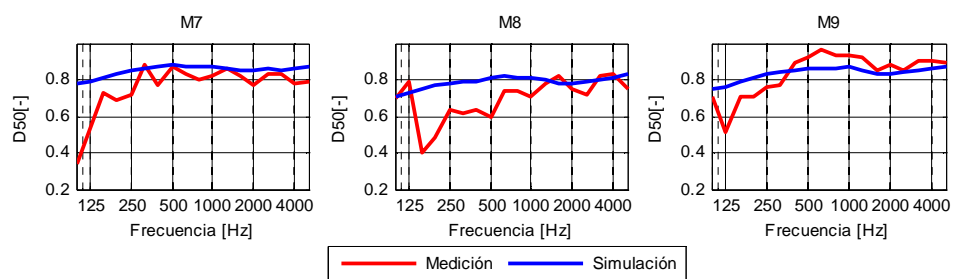


Figura 217. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): C80

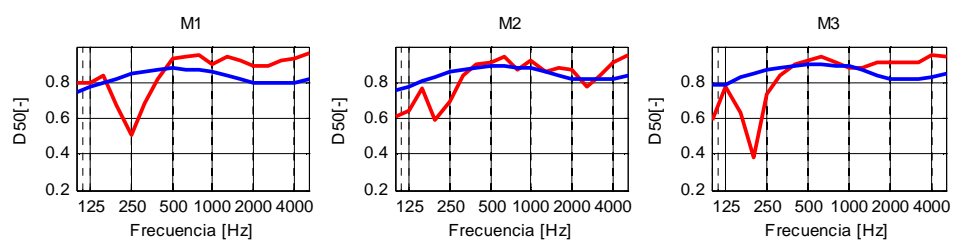


Figura 218. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (OMnidireccional): D50

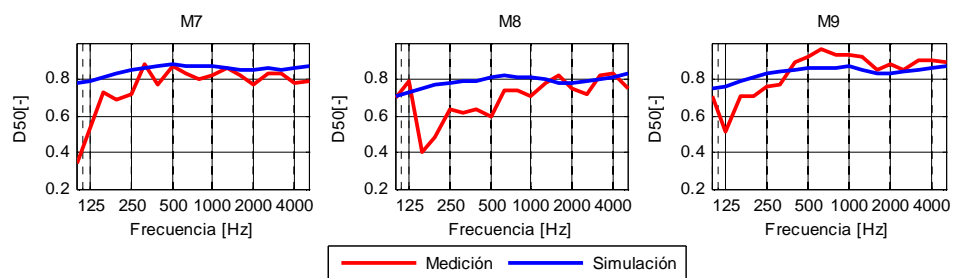


Figura 219. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): D50

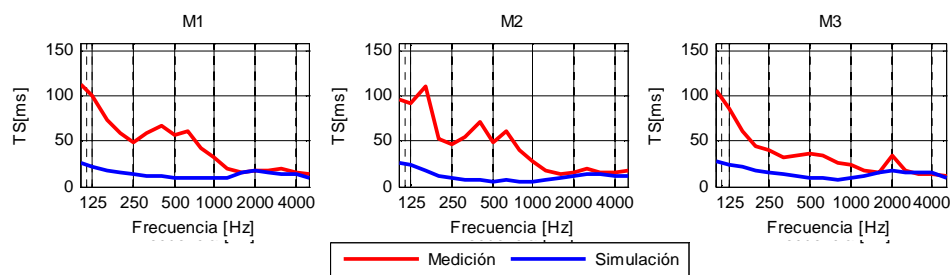


Figura 220. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Pantalla): Ts

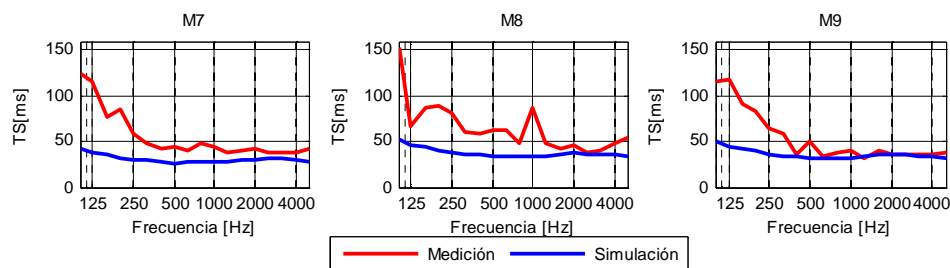


Figura 221. Promedios por micrófono de mediciones y simulación (Surround): Ts

### 10.3.2. Comparación entre métodos

En este apartado se incluirán algunas de las representaciones de los promedios por posición de micrófono que presentan mayores diferencias entre uno u otro método de medida.

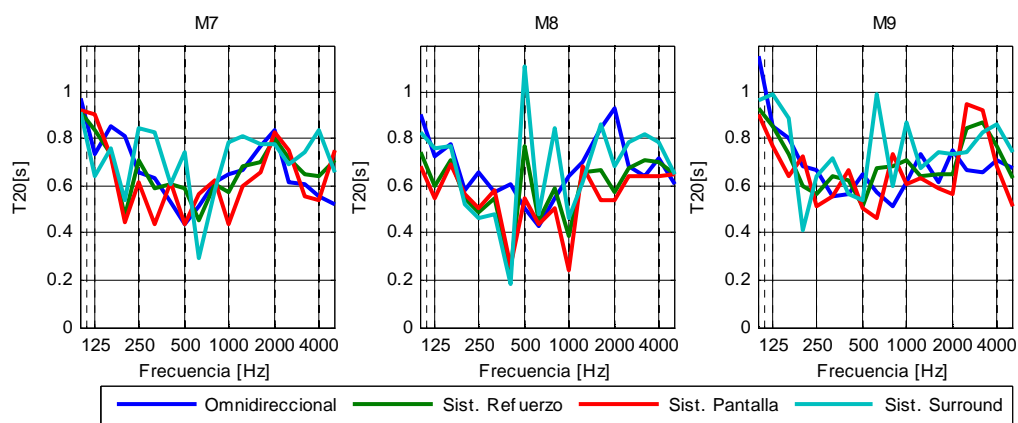


Figura 222. Promedios por micrófono de mediciones: T20

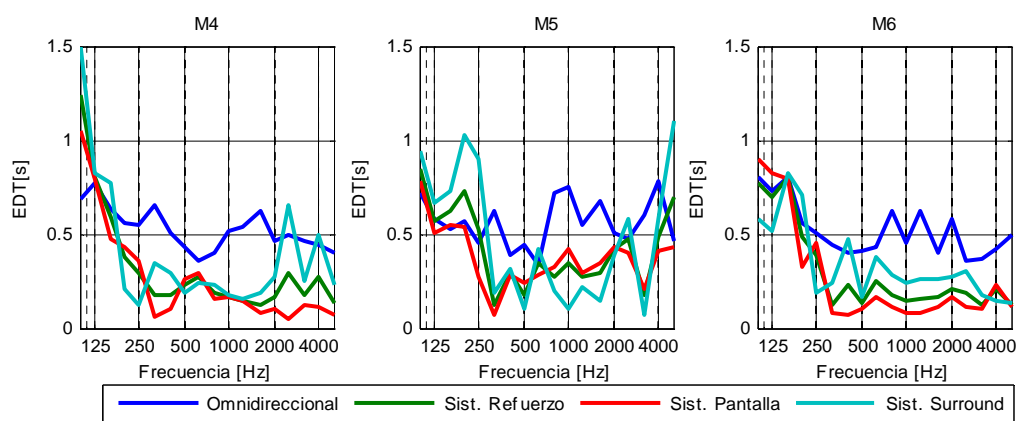


Figura 223. Promedios por micrófono de mediciones: EDT (I)

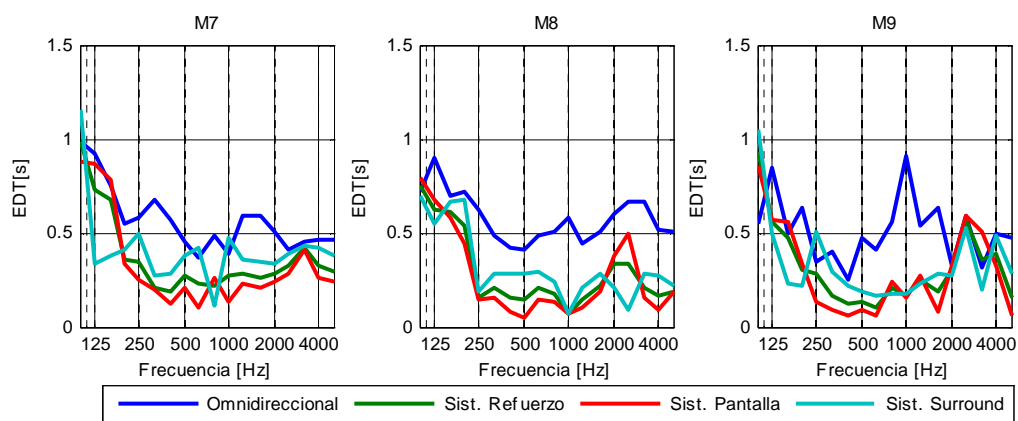


Figura 224. Promedios por micrófono de mediciones: EDT (II)

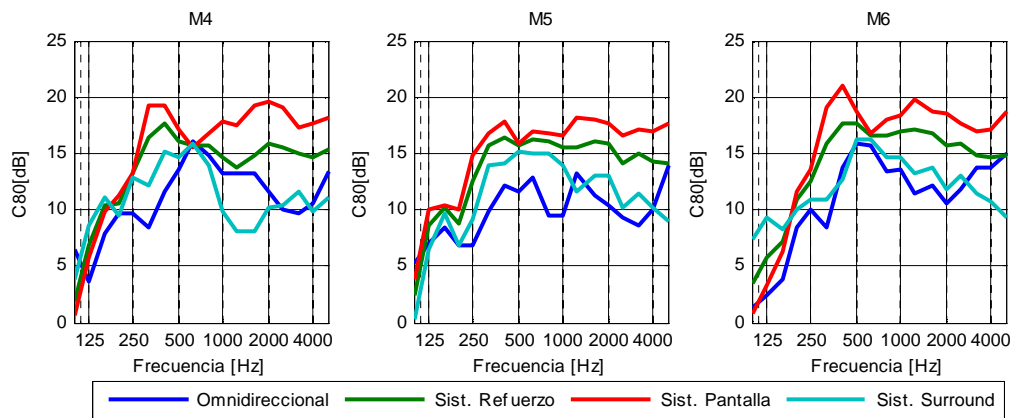


Figura 225. Promedios por micrófono de mediciones: C80

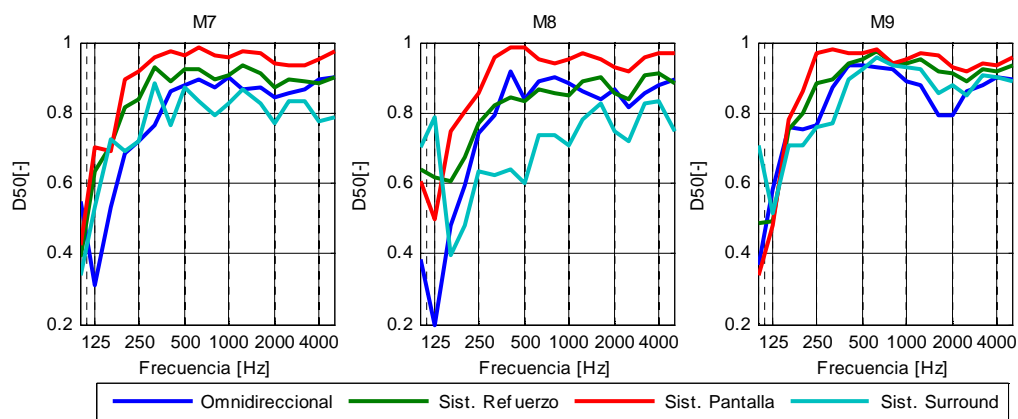


Figura 226. Promedios por micrófono de mediciones: D50

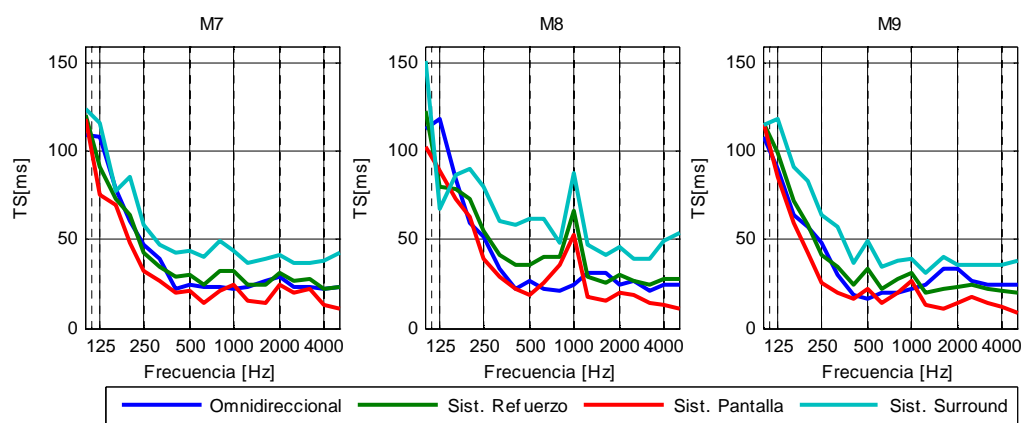


Figura 227. Promedios por micrófono de mediciones: Ts

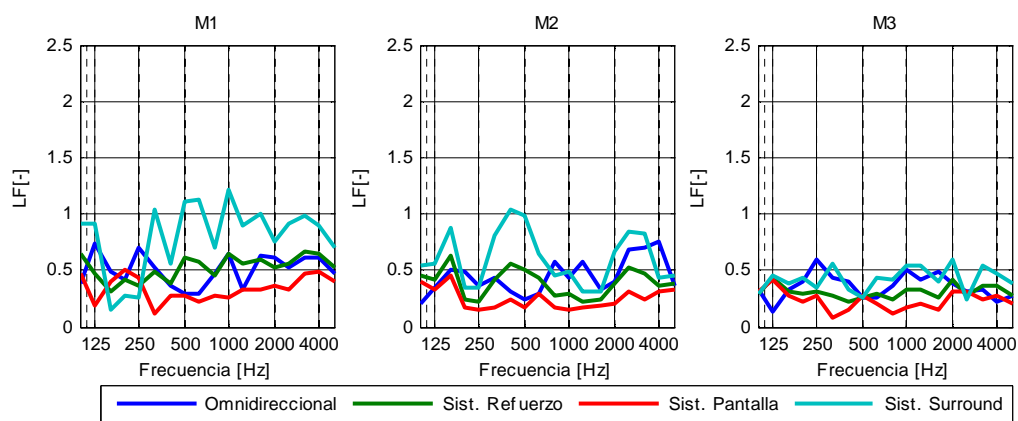


Figura 228. Promedios por micrófono de mediciones: LF (I)

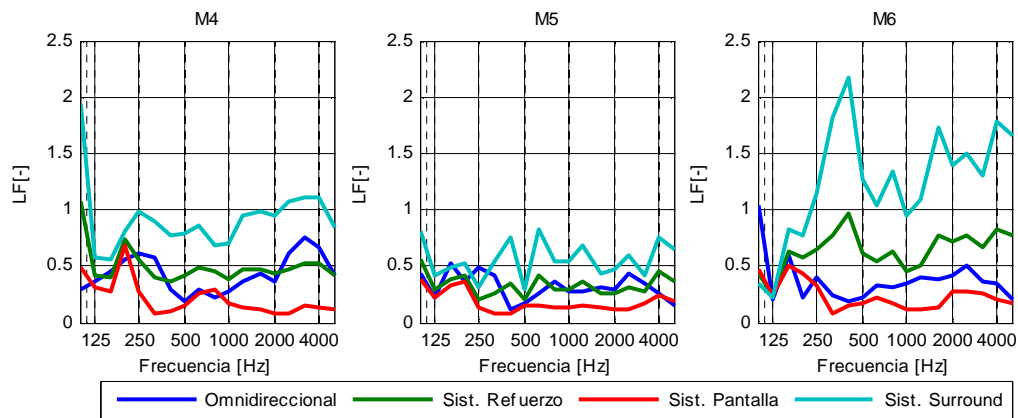


Figura 229. Promedios por micrófono de mediciones: LF (II)

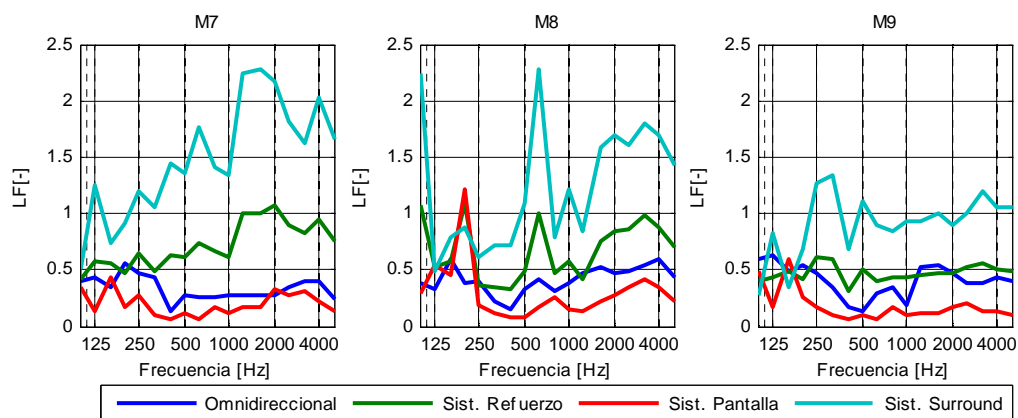


Figura 230. Promedios por micrófono de mediciones: LF (III)



# **11 Referencias bibliográficas**





- [1] SMPTE EG 18, "*Design of Effective Cine Theaters*", 1994.
- [2] Lucasfilm Ltd., "*Recommended guidelines for presentation quality and theatre performance for indoor theatres*", 2000.
- [3] UNE-EN ISO 3382-1, "Acústica – Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos", 2010.
- [4] AFMG. "EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*)", Ayuda en línea en <http://ease.afmg.eu/>. Consultado en abril de 2014.
- [5] Acoustics Engineering, "Ayuda del software DIRAC 5", 2011.
- [6] UNE-EN ISO 3382-2, "Acústica – Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios", 2008.
- [7] UNE-EN ISO 3382-3, "Acústica – Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 3: Oficinas diáfanos", 2012.
- [8] Arau-Puchades, H., "¿Es el criterio acústico el paradigma de la excelencia acústica en el diseño de salas?", *Acústica 2008*, Coimbra, 20-22 de octubre de 2008.
- [9] Lucasfilm Ltd., [www.thx.com](http://www.thx.com). Consultado en junio de 2014.
- [10] Hidaka, T., "*Supplemental data of dependence of objective room acoustical parameters on source and receiver positions at field measurement*", *Acoustical science and technology*, vol. 26, nº 2, pp. 128-135, 2005.
- [11] Montell, R.; Cerdá, S.; Segura, J.; Giménez, A.; Cibrián, R.; Barba, A., "Determinación del número de posiciones de medida en una sala mediante el uso de variogramas", *Tecniacústica Valladolid*, octubre 2013.
- [12] Bradley J.S.; Halliwell R.E., "*Accuracy and reproducibility of auditorium acoustics measures*", *Proceedings of British Institute of Acoustics, Spring'88 Meeting, Cambridge (UK) Volume 10, Part 4*, 339-406, 1988.
- [13] Pelorson X.; Vian J.P.; Polack J.D., "*On the variability of room acoustical parameters: reproducibility and statistical validity*", *Applied Acoustics* 37, 175-198, 1992.
- [14] Nielsen, J.L.; Halstead, M.M.; Marshall, A.H., "*On spatial validity of room acoustical measures*", *Proceedings of 16th International Congress on Acoustics (ICA)*, Seattle (US), 1998.

- [15] Witew, I.; Vorländer, M.; "*Uncertainties of room acoustical measurements- influence of the exact source and receiver positions*", Proceedings of British Institute of Acoustics, Vol 33 (2), 2011.
- [16] Arana, M.; "*Predictions vs measurements in room acoustics: a difficult adjustment.*", International Seminar on Virtual Acoustics, Valencia, 24-25 de noviembre de 2011.
- [17] Behler, G. K.; "*Uncertainties of measured parameters in room acoustics caused by the directivity of source and/or receiver*", Proc. Forum Acusticum, Sevilla, España, 2002.
- [18] San Martín, R.; Arana, M., "*Uncertainties caused by source directivity in room-acoustic investigations*", Journal of Acoustical Society of America; 123 (6), 133-138, 2008.
- [19] Halmrast, T.; Gade, A.; Winsvold, B., "*Simultaneous Measurements of Room-Acoustic Parameters using different Measuring Equipment*", ICA/ASA98, p 347-348, 1998.
- [20] Halmrast, T.; Buen, A., "*Simplified Room Acoustic Measurements*", Journal of the Acoustical Society of America, 123 (5), 2975, 2008.
- [21] Jambrosic, K.; Horvat, H.; Domitrovic, H., "*The influence of excitation type on reverberation time measurements*", 3rd Congress of the Alps Adria Acoustics Association, Graz – Austria, 27– 28 de septiembre de 2007.
- [22] Horvat, H.; Jambrosic, K.; Domitrovic, H., "*Methods of measuring the reverberation time*", 3rd Congress of the Alps Adria Acoustics Association, Graz – Austria, 27– 28 de septiembre de 2007.
- [23] Passero, CRM; Zannin, PHT., "*Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods, computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades' formulas*", Applied Acoustics Journal , 2010.
- [24] Arau-Puchades, H.. "*An improved Reverberation Formulae*", Acta Acustica united with Acustica, Volume 65, Number 4, pp. 163-180, 1988.
- [25] Neubauer, R.; Kostek, B., "*Prediction of the Reverberation Time in rectangular Rooms with Non-uniformly distributed sound absorption*", Archives of Acoustics, 26 3, 183-201, 2001.
- [26] Arregui, A.; Machín, J.; San Martín, R.; Arana, M., "*Variación espacial del parámetro T30 y su influencia en la caracterización de una sala.*", Tecniacústica Valladolid, octubre 2013
- [27] Horvat, H.; Jambrosic, K.; Domitrovic, H., "*A comparison of impulse-like sources to be used in reverberation time measurements*", Acoustics'08, Paris, 29 junio- 4 julio 2008.

- 
- [28] Beranek, L. L., *"Music, Acoustics, and Architecture"*, John Wiley and Son, New York, 1962.
- [29] Skålevik, M., *"Room acoustical parameters at listeners' ears – can preferred concert hall acoustics be predicted and explained?"*, 20th International Congress on Acoustics, 23-27 de agosto de 2010.
- [30] Skålevik, M., *"Music Room Acoustics – Critical Parameters Toward a new Standard"*, Baltic Nordic Acoustics Meeting (BNAM), 18-20 de junio de 2012.
- [31] Skålevik, M., *"Small Room Acoustics – The Hard Case"*, Forum Acusticum, 2011.
- [32] Skålevik, M., *"Reverberation Time – the mother of all room acoustical parameters"*, Baltic Nordic Acoustics Meeting (BNAM), 10-12 de mayo de 2010.
- [33] Hak, C.; Vertegaal, H., *"What exactly is time infinity for acoustical parameters?"*, 16th Congreso on Sound and Vibration, Kraków, 5-9 de julio de 2009.
- [34] Morset Sound Development, *Software WIN MLS*, <http://www.winmls.com/> Consultado en Marzo de 2014.
- [35] Acoustics Engineering, *Software DIRAC*, <http://www.acoustics-engineering.com/> Consultado en Marzo de 2014
- [36] Machín, J.; Arregui, A.; San Martín, R.; Arana, M., *"ARETO 1.0: software para la caracterización acústica de recintos."*, Tecniacústica Valladolid, octubre 2013.
- [37] Torres Sánchez, J.J.; Martín Cruzado, C.; Luna Ramírez, S., *"Software acústico de medida y evaluación de recintos"*, Tecniacústica Valladolid, octubre 2013.
- [38] Bueno, A.; León, Á. L.; Galindo, M., *"Simulación acústica de la iglesia de Santa Ana de Moratalaz"*, Internacional Seminar on Virtual Acoustics, Valencia, 24-25 de noviembre de 2011.
- [39] Fernández, M.; Peiró, A.; Ruiz, R.; Pedrero, A.; Díaz, C., *"Estudio del acoplamiento acústico en la catedral de Toledo a partir de medidas experimentales"*, Tecniacústica Valladolid, octubre 2013.
- [40] Vorländer, M., *"Prediction tools in acoustics - Can we trust the PC?"*, Proc. Baltic Nordic Acoustics Meeting, Bergen, Norway, 2010.
- [41] Christensen, C. L.; Koutsouris, G.; Rindel, J.H., *"The ISO 3382 parameters: Can we simulate them? Can we measure them?"*, International Symposium on Room Acoustics, 9-11 de Julio de 2013.

- [42] Rindel, J.H., "*The Use of Computer Modeling in Room Acoustics*", Paper of the International Conference BALTIC-ACOUSTIC, 2000.
- [43] ISO 17497-1: "*Acoustics -- Sound-scattering properties of surfaces -- Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*", 2004.
- [44] Rindel, J.H., "*Room acoustic modelling techniques: A comparison of a scale model and a computer model for a new opera theatre*", Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010 , Melbourne, Australia, 29-31 de agosto de 2010.
- [45] Vorländer, M., "*Models and algorithms for computer simulations in room acoustics*", International Seminar on Virtual Acoustics, Valencia, 24-25 de noviembre de 2011
- [46] LMS International, *Software Sysnoise*, <http://www.lmsintl.com/SYSNOISE>, Consultado en marzo de 2014.
- [47] Odeon Company, *Software ODEON*, <http://www.odeon.dk/>, Consultado en marzo de 2014.
- [48] San Martín, R. Arregui, A.; Machín, J.; Arana, M., "Validación de modelos simulados de recintos. Análisis espacial", Tecniacústica Valladolid, octubre 2013.
- [49] Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC). <http://sigpac.magrama.es/feqa/visor/> Consultado en abril de 2014.
- [50] García, S., "Diseño de la sala 6 de Kinépolis (Madrid) con un sistema Dolby Atmos" Proyecto Fin de Carrera, EUITT, UPM, Madrid, 2013.
- [51] Maldonado, S.; Perez C., "Estudio acústico y electroacústico de la sala 18 de Kinépolis (Madrid)", Proyecto Fin de Carrera, EUITT-UPM, 2012.

